

Chương 4 Cơ học và Động học

4.1 Giới thiệu chung

Sự tác động của các lực từ bên ngoài đầu tiên là do gió và sự chuyển động của nhiều phần của tua bin không chỉ sản xuất ra năng lượng từ tua bin mà còn tạo nên áp lực lên các vật liệu cấu thành. Đối với người thiết kế tua bin thì các lực này được xem xét đầu tiên bởi vì chúng trực tiếp ảnh hưởng đến cường độ của tua bin và tuổi thọ của nó.

Nói một cách ngắn gọn thì để thực thi cho sản xuất điện năng thì tua bin gió cần phải:

- Sản xuất điện năng;
- Độ cường độ để tồn tại;
- Phải có hiệu quả kinh tế.

Điều này có nghĩa là thiết kế tua bin không chỉ có nhiệm vụ là các thuật ngữ trong khai thác năng lượng. Nó cần có cấu trúc hợp lý sao cho có thể chống lại các lực tác dụng và giá thành chế tạo phải hợp lý tương ứng với giá trị năng lượng được tạo ra.

Mục đích của chương này là thảo luận khuôn khổ cơ khí mà tua bin phải được thiết kế nếu như muốn đạt ba yêu cầu như vậy. Chương này cơ bản chia làm hai phần. Phần thứ nhất cung cấp một số kiến thức về nguyên lý cơ bản liên quan đến động học tua bin gió. Phần thứ hai đề cập trực tiếp hơn với hoạt động của tua bin, các ngoại lực và nội lực.

Phần cơ bản bao gồm tổng quan khá ngắn gọn về các vấn đề cơ bản như: tĩnh học, động học và sức bền vật liệu. Phần tổng quan này ngắn gọn vì nó giả sử là người đọc đã làm quen với các khái niệm liên quan. Một thảo luận khá dài hơn dĩ nhiên là nêu bật một số khái niệm liên quan cụ thể. Phần cơ sở bao gồm thảo luận chi tiết hơn cho hai chủ đề khác là: rung động và độ mồi. Các chủ đề này được thảo luận chi tiết hơn bởi vì nó coi là người đọc có thể ít làm quen với chủ đề này. Chủ đề rung động là quan trọng không chỉ bởi các khái niệm liên quan đến sự rung động của kết cấu thực mà còn do các khái niệm có thể được sử dụng mô tả nhiều khía cạnh của hoạt động rõ to tua bin gió. Chủ đề độ mồi được bao gồm vì nó cung cấp hiểu biết về các thành phần của tua bin được tính như thế nào để chống chịu được trong suốt tuổi thọ với tải trọng liên tục thay đổi.

Phần về chuyển động của tua bin gió và các ngoại lực trình bày phản lực của tua bin đối với các lực động học khí sử dụng cách tiếp cận chi tiết hóa dần. Cách tiếp cận đầu tiên sử dụng phương pháp ổn định đơn giản tiếp theo trực tiếp từ phần 3.7 về vận hành của rô to. Phần tiếp cận thứ hai bao gồm các ảnh hưởng của rô to tua bin quay. Thêm nữa thì môi trường vận hành không được giả thiết là đồng nhất vì vậy tác động của ma sát gió theo phương đứng, chuyển động lắc, và hướng tua bin tất cả được xem xét. Cách tiếp cận này sử dụng một số đơn giản hóa để bài toán có thể giải đưa ra kết quả mang tính đại diện hơn là chính xác. Cuối cùng một số cách chi tiết hơn để tìm hiểu động học tua bin gió cũng được trình bày. Các cách này nhìn chung là phức tạp hoặc khá chuyên môn hóa và cũng phức tạp hơn và ít trực quan. Do vậy nên chúng chỉ được trình bày ngắn gọn và người đọc có thể tham khảo các nguồn khác để chi tiết hơn.

Mặc dù các kiến thức cơ bản được áp dụng cho thiết kế của tất cả các loại tua bin gió nhưng phần này sẽ tập trung vào các loại tua bin gió trực ngang

4.1.1 Các loại ngoại lực

Trong chương này thì thuật ngữ “ngoại lực” liên hệ đến các lực hay mô men có thể tác động lên tua bin. Các lực này có thể tác động lên tua bin là yếu tố chính khi tính toán các yêu cầu kết cấu tua bin. Các lực này có thể chia thành bảy loại:

- Tĩnh lực (không quay)
- Phân bố đều (quay)
- Lực chu kỳ

- Ngắn hạn
- Xung động
- Ngẫu nhiên
- Lực cộng hưởng

Các đặc tính chủ yếu của các lực này và một số ví dụ cho tua bin gió được tóm tắt như sau:

4.1.1.1 Các tĩnh lực (không quay)

Các tĩnh lực như đã được đề cập ở sách này liên quan đến các lực không đổi (không thay đổi theo thời gian) tác động lên các bộ phận không chuyển động. Ví dụ như gió không đổi thổi vào tua bin đứng yên có thể tạo ra tĩnh lực lên nhiều phần của tua bin.

4.1.1.2 Các tĩnh lực (quay)

Các tĩnh lực cũng có thể thay đổi theo thời gian nhưng kết cấu thì có thể đang chuyển động. Ví dụ như gió ổn định thổi vào rô to tua bin trong khi đang phát điện có thể tạo ra tĩnh lực trên các cánh và các phần khác của tua bin. Tính toán các lực cụ thể này xem chi tiết ở Chương 3.

4.1.1.3 Các lực có tính chu kỳ

Các lực chu kỳ là các lực thay đổi trình tự hoặc theo chu kỳ. Khái niệm này áp dụng cho các lực sinh ra do rô to quay. Các lực chu kỳ sinh ra do các yếu tố như trọng lượng của cánh, ma sát gió, chuyển động lệch trục. Các lực chu kỳ có thể liên quan đến rung động của các kết cấu tua bin hoặc một số thành phần của nó.

Như đã nêu ở Mục 3.12, một lực thay đổi trong một số lần liên tiếp quan hệ với một vòng quay của rô to được gọi là lực “trên một vòng” và ký hiệu là P . Ví dụ một cánh quay trong gió với management sát gió tác động lên một lực chu kỳ $1P$. Nếu tua bin có ba cánh thì trực chính sẽ chịu lực chu kỳ là $3P$.

4.1.1.4 Các tải trọng ngắn hạn

Các tải trọng ngắn hạn là các tải trọng thay đổi theo thời gian. Các tải trọng này tăng lên để phản ứng lại với các biến cố bên ngoài tạm thời. Có thể có một vài dao động cùng với phản ứng nhất thời nhưng chúng cuối cùng giảm bớt. Các ví dụ của các tải trọng ngắn hạn bao gồm những tải trong hệ thống truyền động do ứng dụng một phanh gây ra.

4.1.1.5 Các tải trọng xung (tải trọng va đập)

Tải trọng xung là các tải trọng thay đổi theo thời gian trong thời gian tương đối ngắn nhưng có thể đạt đến độ lớn đỉnh điểm đáng kể. Một ví dụ về tải trọng xung là nó được sinh ra do một cánh của rô to xuôi gió khi nó đi qua đằng sau cột tháp (qua “vùng bóng cột tháp”). Các rô to hai cánh thường được treo hoặc gắn vào trực quay tốc độ thấp. Điều này cho phép rô to chuyển động qua lại, giảm tải trọng uốn trên trực nhưng cần phải sử dụng các ván giảm chấn. Lực trên ván giảm chấn khi vượt quá định mức chuẩn của ván là một ví dụ khác của tải trọng xung

4.1.1.6 Các tải trọng ngẫu nhiên

Các tải trọng ngẫu nhiên là các tải trọng thay đổi theo thời gian như là các tải trọng tuần hoàn, ngắn hạn, xung. Trong trường hợp này, tải trọng thay đổi theo phương thức ngẫu nhiên rõ ràng hơn. Trong nhiều trường hợp, giá trị trung bình có thể tương đối ổn định nhưng có thể có nhiều thay đổi đáng kể từ giá trị trung bình này. Các ví dụ của tải trọng ngẫu nhiên là những tải trọng tăng ở các cánh khi gió rất bất ổn.

4.1.1.7 Các tải trọng cảm ứng cộng hưởng

Các tải trọng cảm ứng cộng hưởng là các tải trọng tuần hoàn do phản ứng động lực của một phần nào đó của tua bin gió bị kích ứng tại một tần số tự nhiên của nó gây ra. Nó có đạt đến độ lớn cao. Cần phải tránh các tải trọng cảm ứng cộng hưởng bất cứ lúc nào có thể nhưng nó có thể xảy ra trong các hoàn cảnh vận hành

bất thường hoặc do thiết kế kém. Trong khi những tải này không phải là một loại tải thực sự khác biệt, chúng vẫn được đề cập riêng do những hậu quả nghiêm trọng có thể xảy ra của nó.

4.1.2 Các nguồn tải

Có bốn nguồn tải chính để xem xét trong thiết kế tua bin gió:

- Khí động lực học
- Trọng lực
- Tương tác động lực
- Kiểm soát cơ học

Các tải trọng và các chuyển động có thể tương tác với nhau theo nhiều cách phức tạp, nhưng nên xem xét chúng riêng biệt. Các phần dưới đây mô tả mỗi một tải này.

4.1.2.1 Khí động lực học

Nguồn đầu tiên của các tải trọng tua bin gió mà một người thường nên xem xét là khí động học. Khí động học, đặc biệt liên quan đến sản xuất điện được mô tả trong chương 3. Các tải trọng của môi quan tâm đặc biệt trong thiết kế cấu trúc là các tải trọng mà có thể tăng trong điều kiện có các luồng gió lớn hoặc những tải trọng sinh ra những hư hỏng về độ mồi. Khi một tua bin cố định trong các luồng gió lớn, các lực cản là mối quan tâm chính. Khi tua bin đang hoạt động, đó là các lực nâng tạo ra các tải trọng khí động lực cần quan tâm.

4.1.2.2 Trọng lực

Trọng lực là một nguồn tải quan trọng trên các cánh quạt của các tua bin lớn mặc dù nó ít hơn trên các tua bin nhỏ hơn. Trong mọi trường hợp, trọng lượng lớn của cột tháp là khá quan trọng đối với việc thiết kế cột tháp và lắp đặt máy móc.

4.1.2.3 Các tương tác động lực

Chuyển động sinh ra do các lực khí động học và lực hấp dẫn lần lượt gây ra các tải trong các phần khác của tua bin gió. Ví dụ, hầu như tất cả các tua bin gió trực ngang đều cho phép một số chuyển động về một trục lệch. Khi chuyển động lệch xảy ra trong khi rô to đang quay, sẽ sinh ra các lực hồi chuyển. Những lực này có thể nhiều khi tỷ lệ lệch cao.

4.1.2.4 Kiểm soát cơ học

Việc kiểm soát tua bin gió đôi khi có thể là một nguồn tải đáng kể. Ví dụ như khởi động một tua bin cần sử dụng một máy phát điện cảm ứng hoặc ngừng hoạt động tua bin bằng cách dùng một phanh có thể tạo ra các tải đáng kể trong suốt cấu trúc này.

4.1.3 Các tác động của tải trọng

Các tải trọng do một tua bin gió tạo ra rất quan trọng đối với hai phần chính: (i) độ bền cuối cùng và (ii) độ mồi. Tua bin gió đôi khi cũng có thể sinh ra các tải rất cao và nó phải có khả năng chịu được các tải đó. Vận hành bình thường đi kèm với những tải trọng biến đổi rộng do việc khởi động, ngừng hoạt động, quay chêch hướng và chuyển động của các cánh qua những luồng gió thay đổi liên tục. Những tải trọng thay đổi này có thể làm giảm sức chịu đựng của các thành phần máy móc nên mỗi một bộ phận nhất định cuối cùng có thể ngừng hoạt động ở các tải trọng thấp hơn nhiều so với mức tải trọng có khi nó còn mới.

4.2 Các nguyên lý chung

Phần này trình bày tổng quan về các nguyên lý về động lực học và cơ học cơ bản. Các nguyên lý này là mối quan tâm đặc biệt trong thiết kế tua bin gió. Các nguyên lý cơ bản của cơ học về tua bin gió cũng cần thiết như những nguyên lý của các cấu trúc tương tự khác. Vì lý do đó, các chủ đề được dạy trong các khóa học kỹ thuật về tĩnh học, sức bền vật liệu và động lực học đều có thể được ứng dụng như nhau ở đây. Các chủ đề liên quan đặc biệt bao gồm định luật II Newton, đặc biệt khi được ứng dụng trong hệ thống phôi hợp tiếp tuyến bình thường; mô men quán tính; mô men uốn; các ứng suất và các biến dạng. Những chủ đề này được thảo luận nhiều trong nhiều bài vật lý hoặc kỹ thuật chẳng hạn như Pyte và Singer (1987), Beer và Johnston (1976) và Den Hartog (1961) và sẽ không được nói cụ thể ở đây trong bất kỳ chi tiết nào trừ trường hợp một ví dụ cụ thể đặc biệt liên quan.

4.2.1 Các chủ đề được lựa chọn từ cơ học cơ bản

Có một số chủ đề từ cơ học kỹ thuật cơ bản đáng giá được chọn bởi nó liên quan cụ thể đến năng lượng gió và có thể không quen thuộc đối với tất cả người đọc. Những chủ đề này được tóm tắt ngắn gọn dưới đây.

4.2.1.1 Các lực quán tính

Trong hầu hết giảng dạy gần đây nhất về động lực học, các lực đang được quan tâm này là các lực thực sự riêng biệt. Tuy nhiên đôi khi nó cũng có ích để mô tả các gia tốc nhất định về các “lực quán tính” ảo. Điều này thường được thực hiện trong trường hợp có các hệ thống quay có trong phân tích động lực học rô to tua bin gió. Ví dụ như ảnh hưởng của gia tốc pháp tuyến được được giải thích bằng lực ly tâm quán tính. Ảnh hưởng của lực quán tính được nói đến trong “Nguyên lý của D'Alembert” là tổng tất cả các lực tác động lên một vật thể, bao gồm cả lực quán tính bằng không. Phương pháp này là phương pháp hữu ích nhất khi giải quyết với các bộ phận cố định lớn hơn mà có thể được coi là được tạo thành từ một số lượng lớn các vật thể kết nối chặt chẽ với nhau. Cụ thể, nguyên lý của D'Alembert cho biết là các lực bên trong một bộ phận vững chắc có chuyển động gia tốc có thể được tính toán bằng các phương pháp tĩnh học trên bộ phận đó dưới ảnh hưởng của các lực bên ngoài và lực quán tính. Hơn nữa, một bộ phận cố định với mọi kích thước sẽ hoạt động như một hạt nếu lực tổng hợp của các lực bên ngoài này đi qua trung tâm lực hấp dẫn của nó.

4.2.1.2 Độ uốn của các đầm chìa

Độ uốn của các thanh đầm là một chủ đề về sức bền vật liệu rất quan trọng. Một cánh quạt tua bin gió đơn giản là một đầm chìa nên chủ đề này có liên quan đặc biệt. Một ví dụ đơn giản nhưng rất thú vị là một đầm chìa tải trọng đều. Đối với trường hợp này biểu đồ mô men uốn, $M(x)$, được mô tả bằng một phần parabol đảo ngược.

$$M(x) = \frac{w}{2} (L - x)^2 \quad (4.2.1)$$

Mô men uốn tối đa, M_{max} , là ở mặt gá và được tính bằng:

$$M_{max} = \frac{wL^2}{2} = \frac{WL}{2} \quad (4.2.2)$$

Trong đó L là độ dài đầm, x là khoảng cách từ đầu cuối cố định thanh đầm, w là tải trọng (lực/độ dài đơn vị), W là tổng tải trọng.

Ứng suất tối đa trong thanh đầm cũng ở tại điểm gá và thêm vào đó là khoảng cách tối đa, c , từ đường trung hòa. Đối với uốn một cánh tua bin gió, đường trung hòa gần như là đường cung và c xấp xỉ một nửa độ dày cánh.

Trong dạng phương trình, ứng suất tối đa δ_{max} trong một đàm có mô men quán tính diện tích I có thể là:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I} \quad (4.2.3)$$

4.2.1.3 Chuyển động quay của bộ phận cố định theo mặt phẳng

Quay theo hai chiều Khi một bộ phận chằng hạn như rô to tua bin gió đang quay, nó cần phải có mô men động lượng. Mô men động lượng H được đặc trưng bởi một vec tơ có độ lớn bằng tích tốc độ quay Ω với mô men quán tính khối lượng cực, J . Hướng vec tơ được xác định bằng quy tắc bàn tay phải (do đó nếu các ngón tay phải bị cong trong hướng quay, ngón tay cái chỉ ra hướng phù hợp). Phương trình có dạng:

$$H = J\Omega \quad (4.2.4)$$

Từ các nguyên lý cơ bản, tổng của các mô men được áp dụng, M , về trung tâm khối lượng bằng với tỷ

lệ thời gian thay đổi của mô men động lượng về trung tâm khối lượng. Đó là:

$$\sum M = \dot{H} \quad (4.2.5)$$

Trong hầu hết các tình huống liên quan đến động lực học tua bin gió mô men quán tính có thể được coi là hằng số. Do đó độ lớn của tổng mô men này là:

$$\left| \sum M \right| = J\dot{\Omega} = J\alpha \quad (4.2.6)$$

Trong đó α là góc gia tốc của khối lượng quán tính.

Trong ngữ cảnh của bài viết, a mô men liên tục được áp dụng vào một bộ phận chuyển động quay được ám chỉ như mô men xoắn, và được ký hiệu bằng Q . Mỗi liên hệ này giữa các mô men xoắn được dùng và góc gia tốc α là tương tự với mối liên hệ giữa lực và gia tốc tuyến tính.

$$\Sigma Q = J\alpha \quad (4.2.7)$$

Khi quay ở một tốc độ không đổi, không có góc gia tốc hay góc giảm tốc. Vì vậy, tổng của bất kỳ mô men xoắn được dùng phải bằng không. Ví dụ như nếu một rô to tua bin gió đang quay với một tốc độ không đổi trong điều kiện gió ổn định, mô men xoắn truyền động từ rô to nhất thiết phải bằng mô men xoắn sinh ra cộng với tổn hao mô men xoắn trong hệ thống truyền động.

Công suất/ năng lượng chuyển động quay Một bộ phận quay có chứa động năng, E , được tính bằng:

$$E = \frac{1}{2}J\Omega^2 \quad (4.2.8)$$

Công suất P được tiêu thụ hay tạo ra bằng một bộ phận quay được tính bằng tích của mô men xoắn nhân với tốc độ quay:

$$P = Q\Omega \quad (4.2.9)$$

4.2.1.4 Các bánh răng và các tỷ số bánh răng

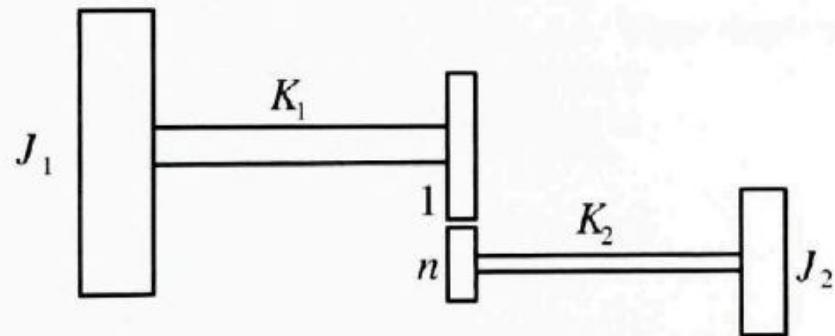
Các bánh răng thường được sử dụng để truyền lực từ trục này sang trục khác trong khi vẫn duy trì một tỷ số cố định giữa các tốc độ của các trục. Trong khi lực đầu vào trong một bộ bánh răng truyền động lý tưởng giữ nguyên bằng với lực đầu ra, các mô men xoắn và tốc độ thay đổi theo tỉ lệ nghịch với nhau. Trong khi đi từ bộ bánh răng nhỏ hơn (1) tới bộ bánh răng lớn hơn (2), tốc độ quay sẽ giảm nhưng mô men xoắn lại tăng. Nói chung:

$$Q_1 \Omega_1 = Q_2 \Omega_2 \quad (4.2.10)$$

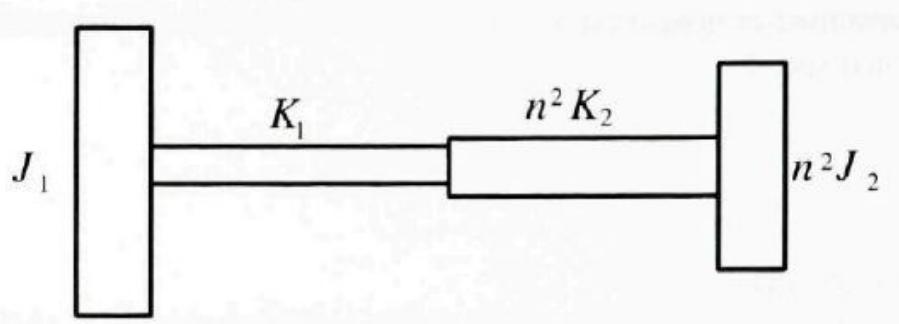
Tỷ số giữa tốc giữa hai bộ bánh răng, Ω_1 / Ω_2 tỉ lệ nghịch với tỷ số của số lượng bánh răng trên mỗi bộ bánh răng, N_1 / N_2 . N_1 / N_2 là tỷ lệ đường kính bánh răng. Vì vậy ta có:

$$\Omega_1 / \Omega_2 = N_2 / N_1 \quad (4.2.11)$$

Khi giải quyết các hệ thống được khớp răng, bao gồm các trục, các lực quán tính và các bánh răng như được chỉ ra trong hình 4.1, có thể coi độ cứng của trục (K_s) và lực quán tính (J_s) là các giá trị tương đương trên một trục đơn. (Lưu ý ở hình dưới đây, ta giả định rằng bản thân các trục không có lực quán tính). Điều này được thực hiện bằng cách nhân tất cả độ cứng và lực quán tính của trục bánh răng thêm n^2 trong đó n là tỷ số tốc độ giữa hai trục. Hệ thống tương đương được chỉ ra trong hình 4.2. Những mối liên hệ này có thể được suy ra bằng cách áp dụng các nguyên lý động năng (đối với lực quán tính) và thế năng (đối với độ cứng) như được mô tả trong các nguyên lý của Thomson năm 1981. Nhiều thông tin về các bánh răng và bộ bánh răng truyền động được cung cấp trong chương 6.



Hình 4.1: Hệ thống được khớp răng; J , lực quán tính; K , độ cứng; n , tỷ số tốc độ giữa các trục; chỉ số dưới 1 và 2, bánh răng 1 và 2.



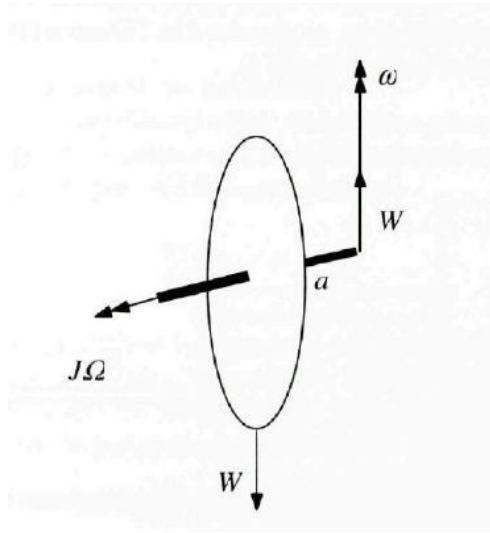
Hình 4.2: Hệ thống tương đương với hệ thống được khớp răng; J , lực quán tính; K , độ cứng; n , tỷ số tốc độ giữa các trục; chỉ số dưới 1 và 2, bánh răng 1 và 2

4.2.1.5 Chuyển động con quay hồi chuyển

Chuyển động con quay hồi chuyển là mối quan tâm đặc biệt trong việc thiết kế tua bin gió bởi vì sự chênh hướng của tua bin trong khi rõ ràng quay có thể dẫn đến những tải trọng hồi chuyển quan trọng. Những ảnh hưởng của chuyển động hồi chuyển được giải thích trong nguyên lý định lý con quay hồi chuyển được tóm tắt dưới đây.

Trong ví dụ này, giả sử một bộ phận cố định với một mô men khôi lượng cực không đổi của lực quán tính J , đang quay với mô men động lượng $J\Omega$. Nguyên lý định lý con quay hồi chuyển cho biết nếu một con quay hồi chuyển của mô men động lượng $J\Omega$ quay với tốc độ α quanh một trục vuông góc với Ω (các tiến động) sau đó một mô men, $J\Omega \omega$ tác dụng lên con quay khoảng một trục vuông góc với cả hai trục con quay, Ω , và trục tiến động ω . Ngược lại, một mô men được dùng song song với Ω có thể gây ra tiến động.

Chuyển động con quay hồi chuyển có thể được lưu ý với sự trợ giúp của hình 4.3. Một bánh xe đạp có trọng lượng W đang quay ngược chiều kim đồng hồ, được hỗ trợ ở phần cuối một trục bằng một lò xo. Bánh xe sẽ đổ nếu nó không quay. Trên thực tế, nó đang quay và thay vì đổ, nó đang tiến động trên mặt phẳng nằm ngang (ngược chiều kim đồng hồ khi nhìn từ trên xuống).



Hình 4.3: Chuyển động con quay hồi chuyển; a khoảng cách tới phần đối trọng bánh xe, J , lực quán tính; W trọng lượng; ω tỷ lệ tiến động; Ω , vận tốc góc.

Mô men tác dụng lên bánh xe là Wa , vì thế :

$$Wa = J\Omega \omega \quad (4.2.12)$$

Vì vậy, tỷ lệ tiến động là :

$$\omega = \frac{Wa}{J\Omega} \quad (4.2.13)$$

Các hướng tương đối của chuyển động quay có liên quan đến nhau bởi tích véc tơ và quy tắc bàn tay phải như sau:

$$\Sigma M = Wa = \omega \times J\Omega \quad (4.2.14)$$

Trong đó M là mô men, ω là tỷ lệ tiến động, và Ω là các véc tơ vận tốc góc.

4.2.2 Độ rung dao động

Thuật ngữ độ rung là chỉ chuyển động tịnh tiến có giới hạn của một vật thể hoặc một đối tượng trong một hệ thống đàn hồi. Chuyển động này đi vào cả hai bên của một ví trí cân bằng. Độ rung là một phần quan trọng trong các tua bin gió bởi vì nó là một phần các cấu trúc đàn hồi và nó hoạt động trong một môi trường không ổn định có khuynh hướng dẫn đến một phản hồi rung. Sự hiện diện của độ rung có thể dẫn đến những độ lệch cần phải được lưu ý trong thiết kế tua bin và có thể dẫn đến những lỗi sớm (do mỏi) của vật liệu hợp thành tua bin.Thêm vào đó, vận hành tua bin gió có thể được hiệu tốt nhất trong hoàn cảnh chuyển động rung. Phần dưới đây cung cấp phần tổng quan về những khía cạnh của độ rung rất quan trọng đối với các ứng dụng tua bin gió.

4.2.2.1 Độ rung đơn của các hệ thống tự do

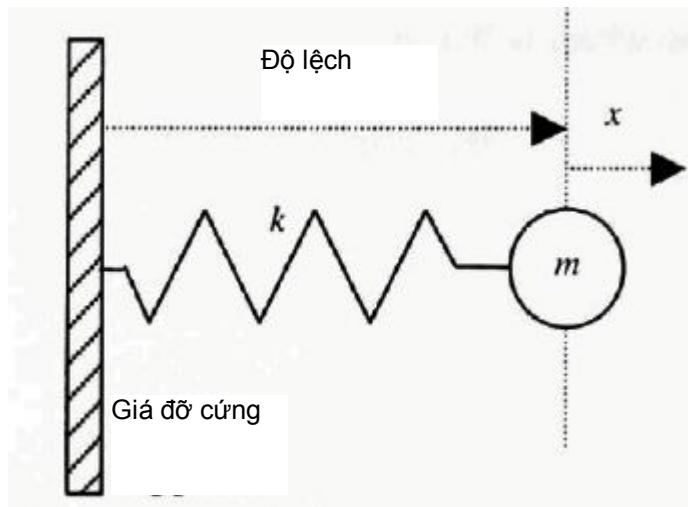
Các dao động rung không giảm chấn Hệ thống dao động rung đơn giản nhất là khối lượng m đi kèm với lò xo không trọng lượng với lò xo hằng số k được chỉ ra trong hình 4.4. Khi thay đổi một khoảng cách x và cho phép di chuyển tự do, khối lượng sẽ dao động rung lên xuống.

Áp dụng định luật II Niu-ton, phương trình điều khiển là:

$$m \ddot{x} = -kx \quad (4.2.15)$$

Khi $t = 0$ tại $x = x_0$, lời giải là:

$$x = x_0 \cos(\omega_n t) \quad (4.2.16)$$



Hình 4.4 : Hệ thống dao động rung không giảm chấn; k hằng số lò xo; m khối lượng; x sự thay đổi.

Trong đó $\omega_n = \sqrt{k/m}$ là tần số tự nhiên của chuyển động. Nói chung, nghiệm có trong hai công thức dạng sin:

$$x = x_0 \cos(\omega_n t) + \frac{x_0}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \quad (4.2.17)$$

trong đó \dot{x}_0 là vận tốc tại thời điểm $t = 0$.

Phương trình có thể được viết theo dạng sin đơn với biên độ C và góc pha ϕ là:

$$\mathbf{x} = \mathbf{C} \sin(\omega_n t + \phi) \quad (4.2.18)$$

Biên độ và góc pha có thể được biểu diễn theo các thông số khác như :

$$C = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \right)^2} \quad (4.2.19)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{x_0 \omega_n}{\dot{x}_0} \right] \quad (4.2.20)$$

Đao động rung có giảm chấn Các dao động rung được mô tả ở trên sẽ vẫn tiếp tục được đề cập. Trong tất cả các dao động rung thực sự, những chuyển động này cuối cùng sẽ biến mất. Tác động này có thể được tạo mẫu bằng cách cho một thành phần giảm chấn nhót. Giảm chấn bao gồm một lực, thường được giả định là tỷ lệ thuận với vận tốc chống lại chuyển động. Do đó, phương trình chuyển động sẽ là:

$$m \ddot{x} = -c \dot{x} - kx \quad (4.2.21)$$

Trong đó c là hằng số giảm chấn và k là hằng số lò xo. Tùy thuộc vào tỷ số của hệ số giảm chấn và hệ số lò xo mà nghiệm có thể là dao động (dưới giảm chấn) hoặc không dao động (trên giảm chấn). Trường hợp giới hạn giữa hai nghiệm này là “giảm chấn quan trọng” trong trường hợp:

$$c = c_c = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n \quad (4.2.22)$$

Để cho thuận tiện, một tỷ số giảm chấn không thứ nguyên $\zeta = c/c_c$ được dùng để phân biệt các chuyển động. Đối với $\zeta < 1$ chuyển động này ở mức dưới giảm chấn; đối với $\zeta > 1$ chuyển động này trên mức giảm chấn.

Nghiệm cho dao động dưới giảm chấn là:

$$x = Ce^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (4.2.23)$$

Trong đó $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ là tần số tự nhiên cho dao động giảm chấn. Lưu ý là tần số này của dao động giảm chấn có khác một chút với dao động rung không có giảm chấn. Biên độ C và góc pha ϕ được xác định trong các điều kiện ban đầu.

Đao động điều hòa cường bức Xem xét khối lượng, lò xo và bộ giảm chấn được thảo luận ở trên. Giả sử nó được truyền động bởi lực hình sin có biên độ F_o và tần số ω (không cần thiết phải bằng ω_n hay ω_d). Do đó phương trình chuyển động sẽ là:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t) \quad (4.2.24)$$

Ta cũng có thể thấy nghiệm trạng thái ổn định với phương trình này là :

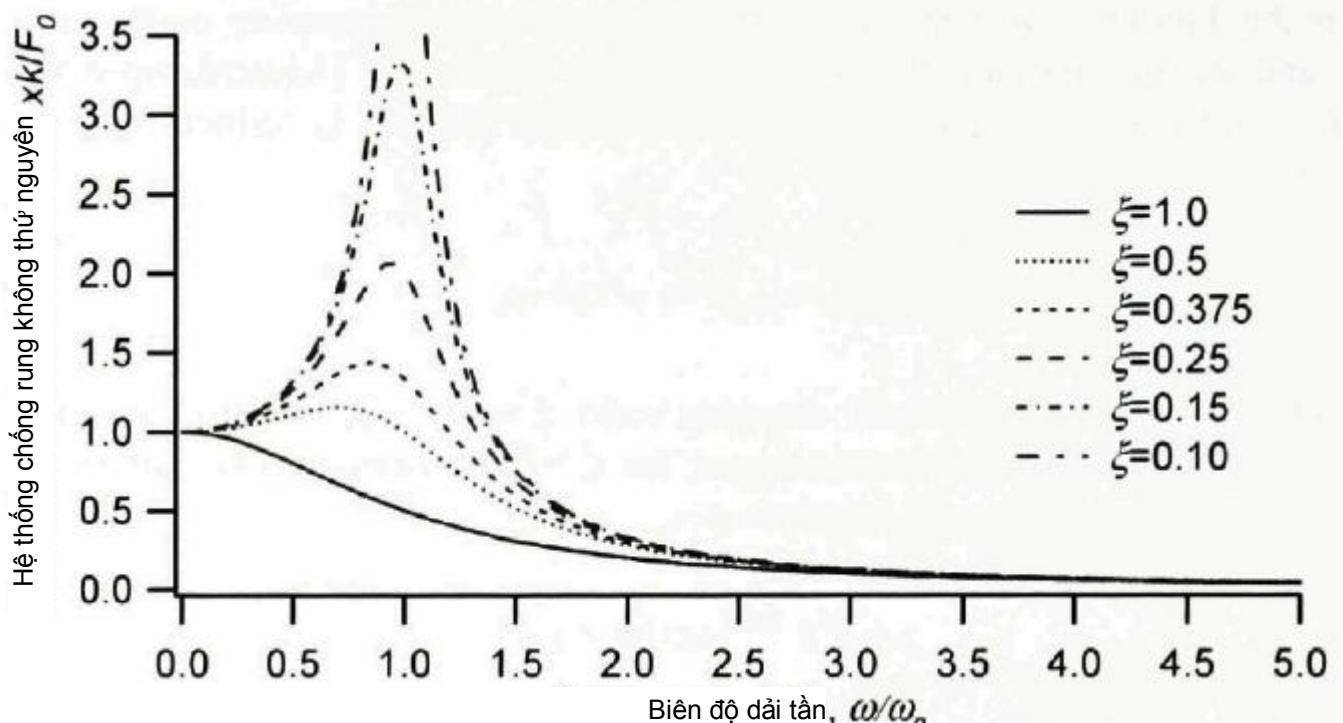
$$x(t) = \frac{F_0}{k} = \frac{\sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)^2]}} \quad (4.2.25)$$

Góc pha trong trường hợp này là :

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{2\xi(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right] \quad (4.2.26)$$

Nó nằm trong mối quan tâm đặc biệt nhằm xem xét biên độ phản hồi thứ nguyên được tính bằng:

$$\frac{xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)^2]}} \quad (4.2.27)$$



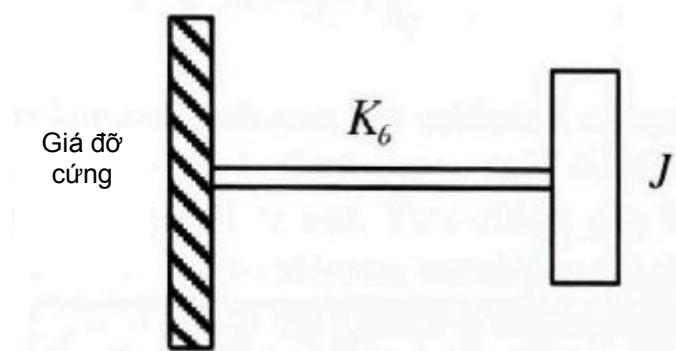
Hình 4.5: Hệ thống đáp với sự dao động cưỡng bức; ζ , hệ thống chống rung không thứ nguyên.

Khi tần số kích thích gần bằng tần số tự nhiên, biên độ của hệ thống đáp sẽ lớn hơn. Tăng bộ phận giảm sóc sẽ làm giảm giá trị cực đại, nhưng chỉ giảm nhẹ. Hơn nữa, giá trị cực đại ở mức cao nhất thì tần số kích thích sẽ bằng tần số tự nhiên (bỏ qua ảnh hưởng của bộ phận giảm sóc). Việc tăng biên độ cao có thể xảy ra khi tần số kích thích gần bằng tần số tự nhiên (được chỉ ra trên hình 4.5).

Đao động rung quay: Nếu giá của một moment khối lượng cực được gắn với một giá cứng thông qua lò xo quay với độ cứng quay k_θ được chỉ trong hình 4.6. Phương trình chuyển động với công thức sau đây :

$$J \ddot{\theta} = -k_\theta \theta \quad (4.2.28)$$

Các giải quyết cho dao động quay tương tự với dao động tinh tuyến mà chúng ta đã thảo luận ở phần trước. Dao động quay là một phần đặc biệt quan trọng trong thiết kế tuabin gió cho các hệ thống trực và động lực học hệ thống truyền động. Nó cũng được sử dụng trong mô hình rôto lò xo khớp nối được tinh tiến hóa được thiết kế trong hình 4.3.2.



Hình 4.6: Hệ thống rung quay, J : momen quán tính khối cực, K_6 : độ cứng quay của lò xo

4.2.2.2 Dao động của đàm chìa.

Cần coi trọng việc xem xét dao động của đàm chìa, vì nhiều hướng của tuabin gió cũng tương tự như các đàm chìa. Chúng gồm có các cột tuabin và các cánh quạt.

Các dao động rung và các dạng thức dao động: Hãy lưu ý rằng khôi rung trên một lò xo dao động với tần số tự nhiên chỉ tồn tại ở dạng số đơn. Chỉ có duy nhất một bước đó là khôi lượng sẽ được tính vào trong khi chuyển động. Trong khôi lượng bội số, số lượng tần số tự nhiên và các bước sẽ tăng lên. Với các vật kế tiếp, có một số vô hạn của các tần số tự nhiên. Với tần số tự nhiên, thì nó tương ứng với một dạng định thức chỉ số dao động. Thực tế cho thấy, chỉ một số tần số tự nhiên thấp nhất của đàm thường là quan trọng.

Dao động rung của đàm chìa không đổi: Dao động trên lý thuyết, một rãm mặt cắt không đổi của mặt cắt ngang và các đặc điểm của vật liệu có thể được mô hình hóa bởi một phương trình giải tích được biết như phương trình Euler cho các đàm. Phương trình này đặc biệt hữu ích bởi vì nó cho phép xác định bậc nhất của các tần số tự nhiên được tính dễ dàng cho nhiều đàm. Người đọc có thể tham khảo các nguồn khác (ví dụ như của Thomson, 1981) để biết thêm các chi tiết phát triển của phương trình đàm Euler. Phần này sẽ tự giới hạn để trình bày phương trình đàm chìa với đủ các chi tiết để có thể áp dụng.

Công thức của phương trình Euler với độ lệch Y , một rãm mặt cắt không đổi với chiều dạng là L và dạng dao động i là:

$$y_i = A \left\{ \cosh\left(\frac{(\beta L)_i}{L}x\right) - \cos(\beta x) - \frac{\sinh(\beta L)_i - \sin(\beta L)_i}{\cosh(\beta L)_i + \cos(\beta L)_i} \left[\sinh\left(\frac{(\beta L)_i}{L}x\right) - \sin\left(\frac{(\beta L)_i}{L}x\right) \right] \right\} \quad (4.2.29)$$

Tham số $(\beta L)_i$ liên quan tới các tần số tự nhiên, ω_i mật độ trên đơn vị dài $\tilde{\rho}$ biểu đồ mômen quán tính: I và mô đun đòn hồi E của đàm được tính theo công thức sau:

$$(\beta L)_i^4 = \tilde{\rho} \omega_i^2 / (EIL^4) \quad (4.2.30)$$

Từ phương trình 4.2.30, các tần số tự nhiên sẽ được tính như sau (rad/ giây):

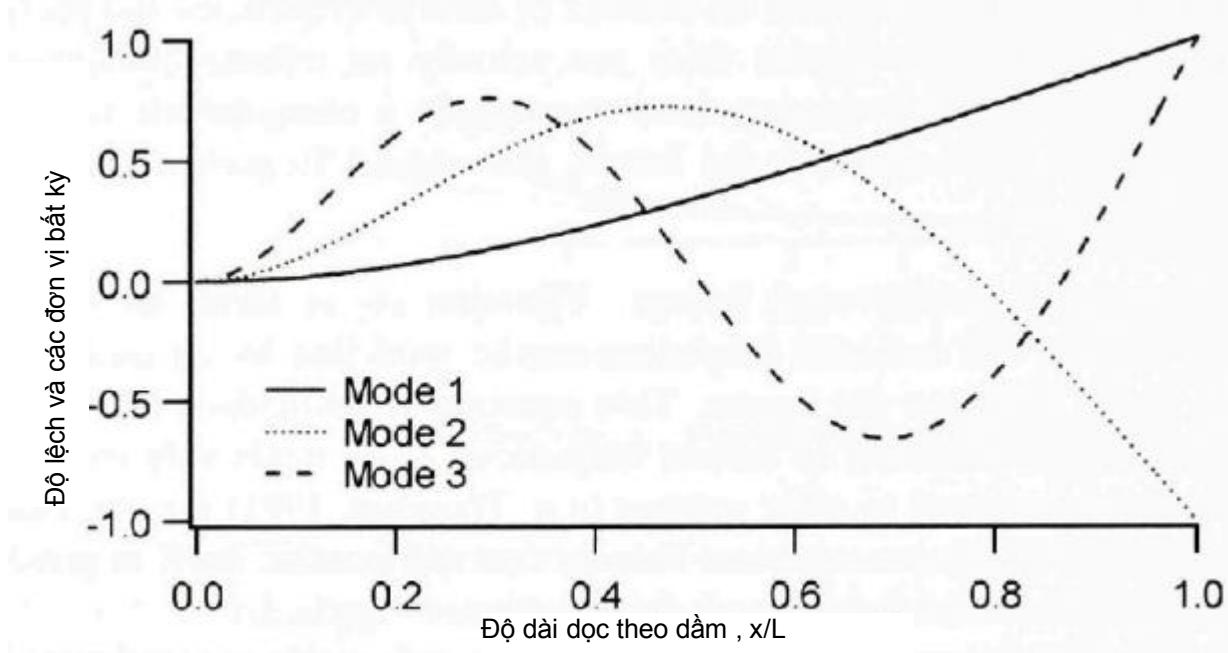
$$\omega_i = \frac{(\beta L)_i^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (4.2.31)$$

Với giá trị của $(\beta L)_i$ được cho là

$$\cosh(\beta L)_i \cos(\beta L)_i + 1 = 0 \quad (4.2.32)$$

Phương trình 4.2.29 cho phép chúng ta quyết định các dạng thức của dao động. Nhưng cần lưu ý rằng nếu A không biết thì có thể tìm ra cách thức bằng cách đưa ra giả thiết về độ lệch $y = I$ tại đầu tự do của đầm.

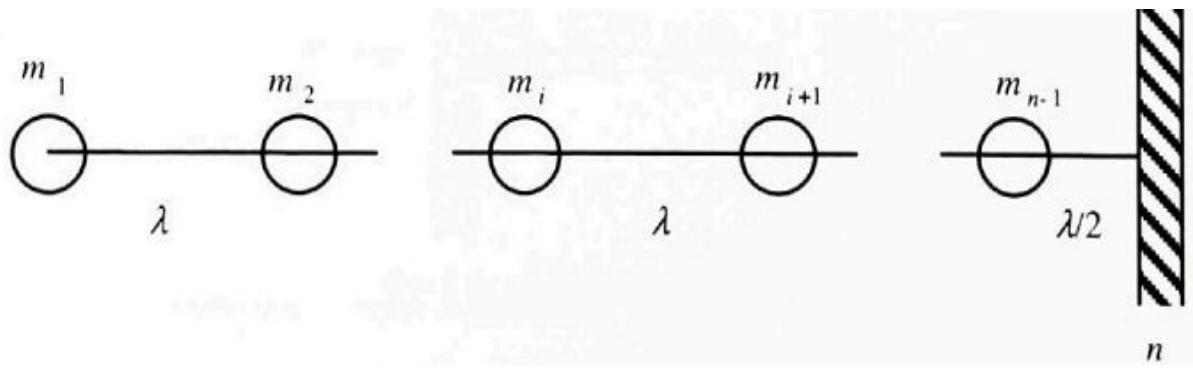
Kết quả $(\beta L)_i^2$ là các hằng số, với các trường hợp các đầm có đầu mút thừa, các giá trị số thì lấy ba số đầu như là 3.52, 22.4 và 61.7. Hình 4 chỉ ra rằng dạng thức của dao động của đầm chia không đổi dựa vào phương trình 4.2.29 và 4.2.32



Hình 4.7: Dao động của đầm chia không đổi

Dao động rung của đầm tổng quát: Như thảo luận ở phần trước đã giải quyết với rãm mặt cắt không đổi. Phần này sẽ giải quyết một trường hợp tổng quát hơn. Phần này sẽ tóm tắt cách sử dụng pháp Myklestad liên quan tới việc lập mô hình đầm mới một số các khối lượng tập chung nối với các phần đầm không có khối lượng. Phương pháp của Myklestad khá linh hoạt và có thể được áp dụng với hầu như tất cả các đầm, nhưng như ở phần trước, thảo luận sẽ chỉ giới hạn ở các đầm chia. Muốn chi tiết hơn, thì tham khảo của Thomson (1981).

Phương pháp này được minh họa ở hình 4.8. Đầm được chia thành phần cắt $n-1$ với số lượng khối như nhau m_6 . Điểm bô sung ở điểm đính kèm. Với khoảng cách λ_1 ở các khối là giống nhau. Trong hình này giả định rằng: các khối được đặt ở giữa các phần có kích cỡ như nhau vì vậy khoảng cách các khối gần với điểm đính kèm nhất là $\frac{1}{2}$ so với các điểm khác. Các khớp nối mềm có mômen quán tính I_1 và mô đun đàn hồi E_1 . Đầm ở trong ví dụ này có thể quay với vận tốc Ω từ đường vuông góc của trực với đầm và ngang qua điểm n



Hình 4.8 : Mô hình dầm chia; m_i khối lượng, λ_i khoảng cách giữa các khối; n số các điểm

Phương pháp Myklestad nhằm giải quyết một loạt các phương trình lập dãy. Các phương trình lập dãy có thể được phát triển thêm bằng cách xem xét các lực và moment trên khối lượng và điểm nối liền ở hình 4.9 chỉ ra biểu đồ hình khối tự do trong một phần của dầm quay. Biểu đồ đưa ra lực cắt S_i , lực quán tính (ly tâm) F_i , các mô men uốn M , độ lệch góc θ_i .

Phương trình đầy đủ cho một dầm quay như sau. Lực ly tâm với khoảng cách x_i từ điểm đi kèm trong công thức là:

$$F_i = \Omega^2 \sum_{j=1}^{i-1} m_j x_j \quad (4.2.33a)$$

$$F_{i+1} = F_i + \Omega^2 m_i x_i \quad (4.2.33b)$$

Sử dụng kết quả xấp xỉ của góc nhỏ, các lực cắt sẽ tính theo công thức:

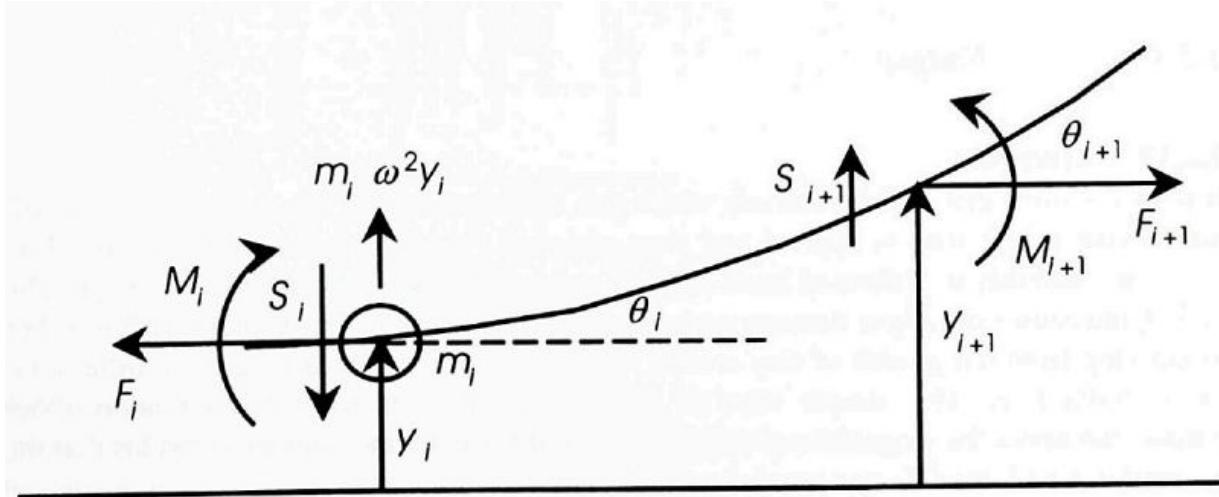
$$S_{i+1} = S_i - \omega^2 m_i y_i - F_{i+1} \theta_i \quad (4.2.34)$$

Mômen sẽ được tính theo công thức:

$$M_{i+1} = \left[M_i - S_{i+1} \left(\lambda_i - F_{i+1} \frac{\lambda_i^3}{3E_i I_i} \right) + \theta_i \lambda_i F_{i+1} \right] / \left(1 - F_{i+1} \frac{\lambda_i^2}{2E_i I_i} \right) \quad (4.2.35)$$

Góc của các phần thanh dầm theo chiều ngang là:

$$\theta_{i+1} = \theta_i + M_{i+1} \left(\frac{\lambda_i}{E_i I_i} \right) + S_{i+1} \left(\frac{\lambda_i^2}{2E_i I_i} \right) \quad (4.2.36)$$



Hình 4.9: Biểu đồ khói tự do của phần đầm với định nghĩa các biến nhùn (đã ghi ở bản viết)

Cuối cùng, các độ lệch từ đường nằm ngang, đi qua điểm cố định là:

$$y_{i+1} = y_i + \theta_i \lambda_i + M_{i+1} \left(\frac{\lambda_i^2}{2E_i I_i} \right) + S_{i+1} \left(\frac{\lambda_i^3}{3E_i I_i} \right) \quad (4.2.37)$$

Hàng loạt các phương trình được giải quyết bằng cách tìm ra các tần số tự nhiên mà tìm ra kết quả bằng là độ lệch được tính toán bằng không ở điểm đi kèm. Quá trình này được tính toán bằng máy tính bắt đầu bằng giả thiết một tần số tự nhiên ω và trình bày một loạt các phép tính. Các phép tính này sẽ được lặp lại với một giả thiết mới cho tần số tự nhiên cho đến khi tìm thấy độ nghiêng gần với không. Hai hệ tính toán sẽ đảm trách. Chúng bắt đầu tại đầu tự do của đầm, bắt đầu với $y_{1,1} = 1$ và $\delta_{1,2} = 0$, rồi với $y_{1,1} = 0$ và $\delta_{1,2} = 1$. Ở đây chỉ số giây chỉ ra các hệ tính toán. Việc tính toán được đưa ra cho mỗi mặt cắt đến khi đạt đến mặt cắt n . Các tính toán này sẽ mang lại kết quả $y_{n,2}$, $\delta_{n,1}$ và $\delta_{n,2}$. Độ lệch mong muốn (đạt đến không) là:

$$y_n = y_{n,1} - y_{n,2} (\delta_{n,1} / \delta_{n,2}) \quad (4.2.38)$$

Toàn bộ quá trình có thể lặp đi lặp lại để tìm các tần số tự nhiên bổ sung. Cần có nhiều tần số tự nhiên bằng số lượng các khồi. Bởi vì lực quán tính trên đầm quay gia cố biệt quả đầm, các tần số tự nhiên của đầm quay sẽ cao hơn tần số tự nhiên của đầm không quay.

4.2.2.3 Các hệ thống xoắn

Nhiều bộ phận tuabin gió, đặc biệt các bộ phận tuabin gió trong hệ thống truyền động có thể mô hình hóa bằng một loạt các đĩa nối với các trục. Trong các mô hình này, giả thiết các đĩa có quán tính nhưng hoàn toàn cố định, trong khi các trục được gia cố mà không có quán tính. Các tần số tự nhiên cho những hệ thống này sẽ được tính toán theo phương pháp của Holzer. Với các phương trình lập dãy Myklestad có thể được sử dụng để quyết định góc và mômen xoay dọc theo trục. Chi tiết về phương pháp này nằm ngoài giới hạn của quyển sách này. Người đọc có thể tham khảo Thomson (1981) và các sách tương tự với nhiều thông tin hơn.

4. 2. 3 Độ mỏi

4.2.3.1 Tổng quát

Chúng ta cũng đã biết rằng nhiều nguyên liệu có thể chịu được một độ tải trọng khi được áp dụng một lần, sẽ không thể tồn tại nếu một tải trọng được áp dụng và bỏ qua một vài lần. Không có khả năng chịu đựng các tải trọng tăng lên khi ứng dụng nhiều lần được gọi là sự cố do mỏi. Các nguyên nhân gây ra sự cố độ mỏi rất phức tạp, nhưng chúng được hình thành đơn giản nếu xuất phát từ tăng các đường nứt nhỏ li ti. Với mỗi chu trình, các đường nứt phát triển rất ít, cho đến khi các nguyên liệu bị hư hỏng. Quan sát đơn giản này cũng nhất quán với các quan sát khác về độ mỏi: đại lượng của chu trình tải càng thấp thì số lượng các chu trình mà nguyên liệu chịu đựng được càng cao.

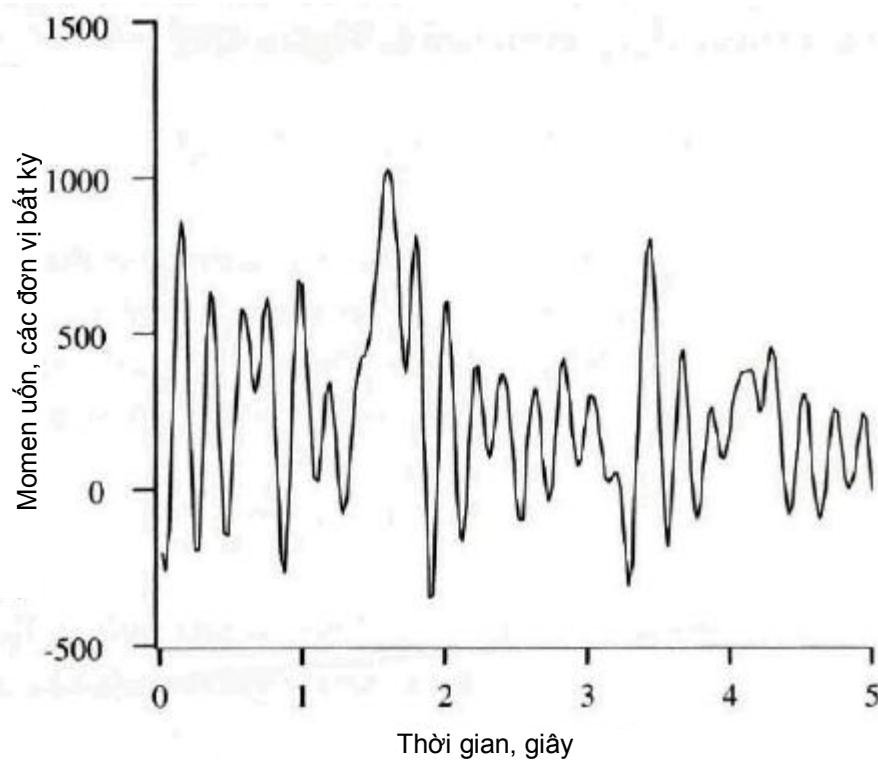
Bản thân các tuabin gió phải phụ thuộc vào số lượng lớn các tải trọng theo chu kỳ. Cận biên thấp nhất trên một số các chu trình ứng suất tạo độ mỏi trong các thành phần tuabin tỷ lệ thuận với số lượng vòng quay của cánh quạt trên tuổi thọ của tuabin. Tổng các vòng quay n_L với tuổi thọ của tuabin là:

$$n_L = 60kn_{rotor}H_{op}Y \quad (4.2.39)$$

K là số lượng các giới hạn chu trình trên vòng quay, n_{rotor} là tốc độ quay của roto (rpm), H_{op} là các giờ hoạt động trên một năm và Y là các năm hoạt động.

Đối với mỗi chu kỳ ứng suất để của cánh quạt, K có thể ít nhất bằng với 1 cho thì hệ thống truyền động hay giá đỡ. K ít nhất bằng số lượng cánh tuabin. Một tuabin lớn với rpm xấp xỉ từ 30 tới 70 hoạt động 4000 giờ trên năm có thể tạo ra 10^8 đến 10^9 vòng quay với tuổi đời là 20 năm. Có thể so sánh điều này với các linh kiện được sản xuất khác – những linh kiện này không chắc có thể tạo ra 10^8 vòng quay theo tuổi đời của chúng.

Thực tế thì một số lượng các giới hạn chu kỳ trên một cánh tuabin có thể nhiều hơn một vòng quay của một roto. Hình 4.10 chỉ ra rằng giám sát thời gian 5 giây của mômen uốn trong định hướng trực bệ cánh tuabin của một tuabin gió với 2 cánh điển hình sử dụng các bộ phận bất kỳ. Roto trong trường hợp này quay hơn một ít một trọng một lần quay/ giây. Như đã thấy thì các chu kỳ lớn nhất xảy ra tương đương với tần số đó, nhưng các chu kỳ nhỏ hơn xảy ra nhiều hơn. Trong trường hợp, có nhiều chu kỳ thì đại lượng và tần số sẽ thay đổi, điều này dẫn tới ứng suất biến đổi. Tất cả điều này gây ra sự cố độ mỏi và cần xem xét kỹ khi thiết kế tuabin gió.



Hình 4.10: Mômen uốn sàn nâng bê mẫu

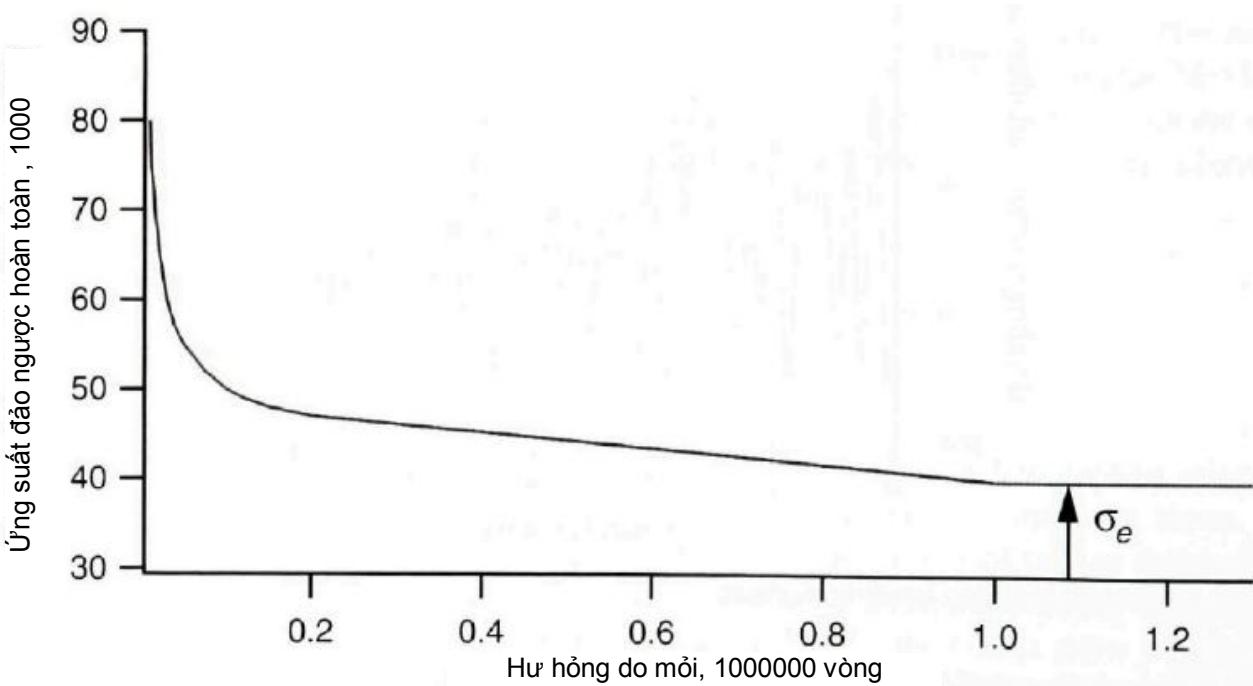
4.2.3.2 Đánh giá độ mỏi.

Theo các thủ tục được đưa ra để đánh giá thiệt hại độ bền mỏi. Nhiều kĩ thuật được phát triển để phân tích độ bền mỏi của kim loại, nhưng chúng cần được phát triển với các nguyên liệu khác như các hỗn hợp. Các phần sau sẽ tóm tắt các phương pháp phân tích độ mỏi được sử dụng phổ biến nhất ở các thiết kế tuabin gió. Các chi tiết về độ bền mỏi nói chung sẽ tìm thêm trong sách của Shigley và Mischke (1989), Spotts (1985) và Ansell (1987). Các thông tin về độ bền mỏi của các tuabin gió sẽ có trong sách của Garrad và Hassan (1986), Setherland và các cộng sự (1995).

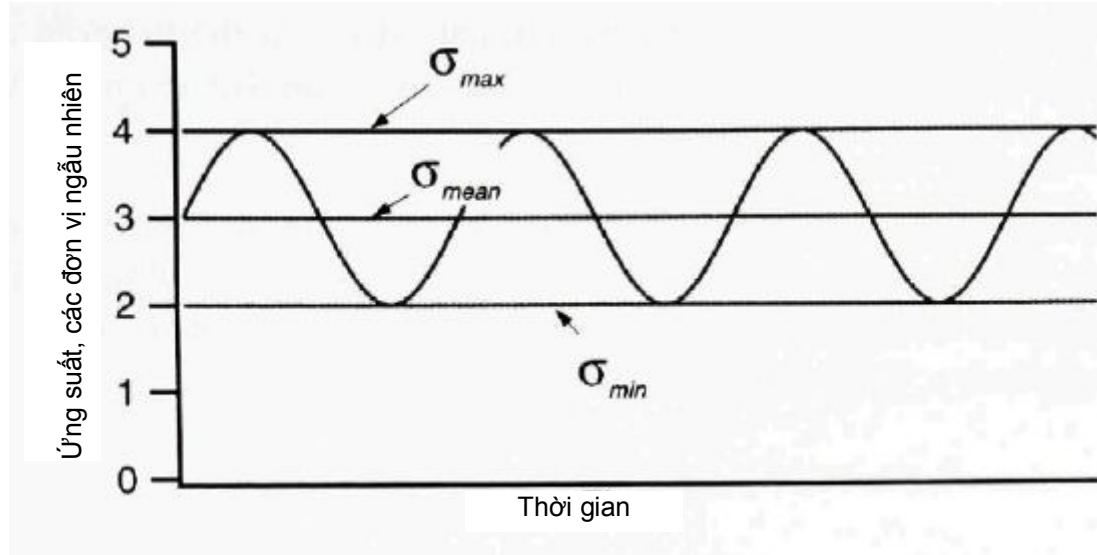
Biểu đồ về kỳ hạn mỏi của máy (S - N) Độ bền mỏi của các nguyên liệu cũng được kiểm tra theo cách truyền thống bằng cách đưa ra một mẫu tải được ứng dụng hình sin khi bị mỏi. Một cách kiểm tra là kiểm tra một đầm quay. Một mẫu được định vị/thiết lập trên một máy kiểm tra và được tải với một ứng suất có sẵn với tải trọng biên. Mẫu này sẽ được quay trong máy để ứng suất có ở các vòng quay. Kiểm tra tiếp tục đến mẫu thử hỏng. Tại trọng đầu tiên có phần giảm hơn so với tải trọng cực hạn. Số lượng các chu trình và các tải sẽ được ghi lại. Tải trọng này sau đó sẽ được giảm ở mẫu thử khác và các quá trình được lặp lại. Dữ liệu cũng được tóm tắt trong tuổi đời/thời hạn sử dụng hay “S-N”, trong đó S là ứng suất (mặc dù cách sử dụng thông thường của để chỉ ra ứng suất) và N là số lượng các vòng quay tới khi hỏng. Hình 4.11 minh họa cho đường cong S-N điển hình. Bằng cách kiểm tra loại này, thì cần lưu ý rằng (i) ứng suất trung bình bằng không, (ii) ứng suất đảo hoàn toàn.

Hầu hết các linh kiện được sản xuất với lãi suất thương mại, ngoại trừ các tuabin gió không quay hơn 10 triệu vòng trong tuổi đời của chúng. Vì vậy, nếu ở mẫu này không hỏng sau 10 triệu vòng quay tại ứng suất đặc biệt (khi các tải giảm liên tục), ứng suất như là giới hạn bền mỏi, σ_e . Giới hạn bền mỏi điển hình nằm trong mức từ 20-50% giới hạn bền kéo cho nhiều nguyên liệu. Trong thực tế, những nguyên liệu này có thể không có giới hạn bền mỏi và có thể không đánh giá được giả định trong thiết kế tuabin gió.

Ứng suất đổi dấu với giá trị trung bình khác không. Các ứng suất đổi dấu không có giá trị trung bình bằng không. Trong trường hợp này được mô tả bởi ứng suất trung bình, σ_m , ứng suất tối đa σ_{max} và ứng suất nhỏ nhất σ_{min} được chỉ ra trong hình 4.12



Hình 4.11: Đường cong S-N điển hình



Hình 4.12: *Ứng suất đổi dấu với giá trị trung bình khác không*

Biên độ ứng suất, $\Delta\sigma$ được định nghĩa là sự khác nhau giữa biên độ cực đại và biên độ cực tiểu

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (4.2.40)$$

Biên độ ứng suất σ_a bằng một nửa biên độ

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2 \quad (4.2.41)$$

Tỉ lệ ứng suất R là tỉ lệ giữa biên độ cực đại và biên độ cực tiểu. Được tính theo công thức:

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = (\sigma_m - \sigma_a) / (\sigma_m + \sigma_a) \quad (4.2.42)$$

Ứng suất đổi dấu với giá trị trung bình bằng không (đảo ngược hoàn toàn) $R=-1$

Thời gian độ mồi của ứng suất thay đổi phụ thuộc vào R (Ví dụ giá trị trung bình). Trong thực tế, giá trị đổi dấu cho độ bền lâu được đưa ra sẽ giảm khi giá trị trung bình tăng. Mối quan hệ này được làm xấp xỉ theo định luật Goodman

$$\sigma_a = \sigma_e (1 - \sigma_m / \sigma_u) \quad (4.2.43)$$

Trong đó σ_a là biên độ ứng suất cho phép với thời gian mồi và ứng suất trung bình, σ_e ứng suất thay đổi trung bình bằng không ($R = -1$) đổi với thời gian mồi mong muốn và σ_u là ứng suất cuối cùng.

Định luật Goodman có thể được đảo ngược và được sử dụng với các dữ liệu ứng suất đổi dấu với giá trị trung bình bằng không để tìm ra ứng suất đổi dấu giá trị trung bình bằng không tương đương. (Ví dụ Ansell. 1987)

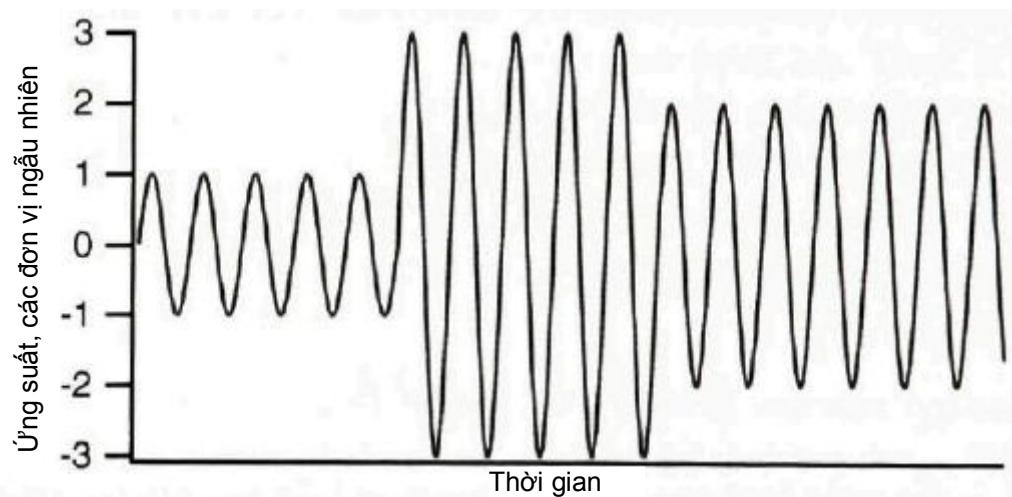
$$\sigma_e = \sigma_a / (1 - \sigma_m / \sigma_u) \quad (4.2.44)$$

Công thức của định luật này cho phép dữ liệu kiểm tra được dung để dự đoán độ bền lâu. Ví dụ giả sử một thành phần lệ thuộc vào ứng suất trung bình $80 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ và ứng suất thay đổi $20 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ và ứng suất cuối cùng của vật liệu là $120 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Ứng suất thay đổi với giá trị trung bình tương đương bằng không (để sử dụng với biểu đồ S-N) có thể là $60 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Hư hỏng: Nếu một thành phần phải chịu nhiều vòng tải hơn có thể bị hỏng. Nó có thể gấp phải sự cố. Thành phần này có thể hỏng sau đó, sau khi các chu trình của các tải bổ sung được gán thêm. Để xác định số lượng này, sự cố đoạn d - được định nghĩa là tỉ lệ số các vòng quay được ứng dụng n , với số lượng các vòng quay hỏng N ở biên độ được đưa ra:

$$d = n / N \quad (4.2.45)$$

Sự cố tích lũy và định luật Miner Một bộ phận có thể chịu các vòng tải nhiều lần của các biên độ khác nhau, được minh họa trong hình 4.13



Hình 4.13: Các vòng tải với các biên độ khác nhau

Trong trường hợp này, sự cố tích lũy D được định nghĩa theo định luật của Miner là tổng các sự cố do mỗi vòng quay tại mỗi biên độ. Thành phần này được cho rằng là sẽ bị lỗi khi tổng sự cố bằng 1.0. Trong trường hợp chung của các vòng tải với các biên độ khác nhau là M , sự cố tích lũy được tính theo công thức:

$$D = \sum n_i / N_i \leq 1 \quad (4.2.26)$$

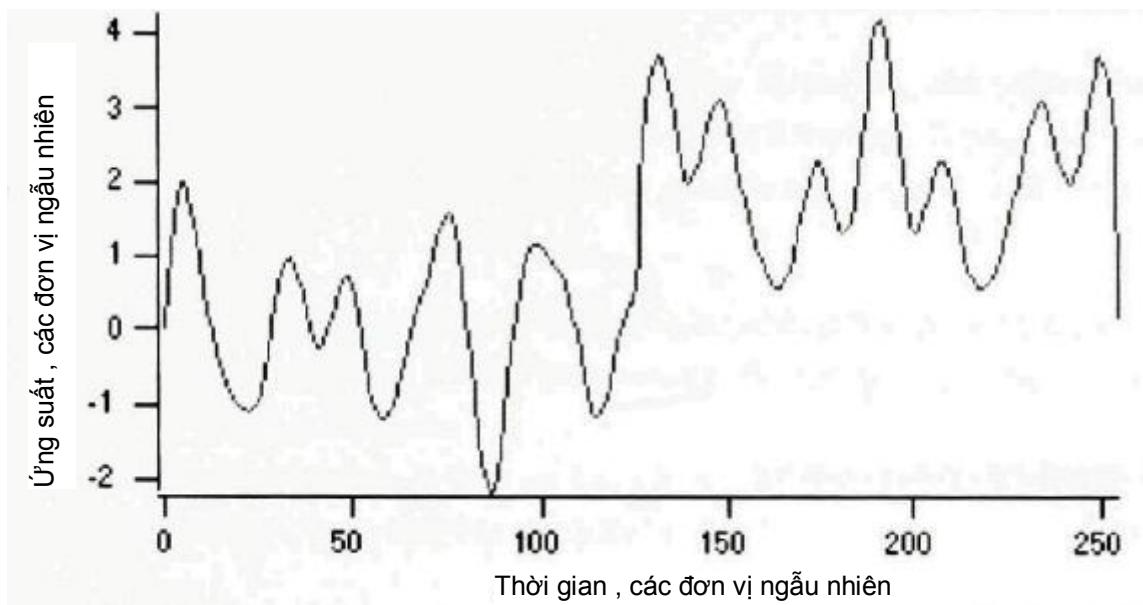
Trong đó n_i là số các vòng tại biên độ thứ i và N_i là số các vòng quay ở biên độ thứ i tới khi bị lỗi.

Để chứng minh điều này, giả sử cho vật liệu trong hình 4.13, trung bình vòng quay tại 1 đơn vị sức chịu là 20 vòng, tại 4 đơn vị là 10 vòng và tại 2.5 đơn vị là 15 vòng.

Sự cố tích lũy do các vòng quay được chỉ ra như sau:

$$D = (4 / 20) + (4 / 10) + (4 / 15) = 0,8667$$

Các vòng tải được ứng dụng ngẫu nhiên: Khi các tải không được áp dụng trong các khối (như trong hình 4.13 nhưng nó xảy ra khá ngẫu nhiên, và cũng khó nhận được các chu trình tải riêng lẻ). Hình 4.14 minh họa cho tình huống này



Hình 4.14: Các chu trình tải ngẫu nhiên

Một kĩ thuật được biết như đếm chu trình vòng mưa (Downing và Socie, 1982) đã phát triển nhận biết các chu trình ứng suất đổi dấu và các ứng suất trung bình từ một loạt các tải ứng dụng ngẫu nhiên. Chỉ tiêu ứng suất đổi dấu và ứng suất trung bình được tìm thấy khi chúng được biến đổi tới các ứng suất đổi dấu trung bình bằng không và tổng các sự cố được đánh giá sử dụng định thức Miner như đã được thảo luận ở trên.

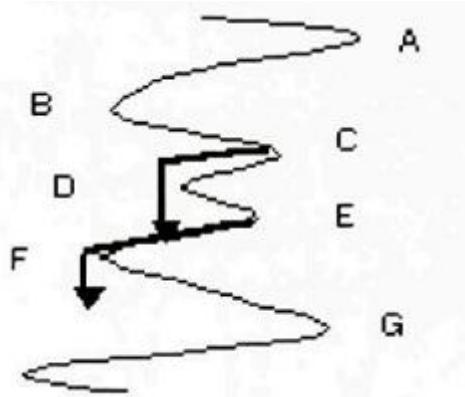
Phương pháp đếm dòng mưa được ứng dụng thích hợp nhất với chỉ tiêu đàn hồi nhiều hơn là chỉ tiêu ứng suất. Nó còn có thể được giải quyết với các vùng không đàn hồi hay đàn hồi của nguyên liệu. Với hầu hết các ứng dụng tuabin gió, các nguyên liệu biến dạng đàn hồi và vì vậy các chỉ tiêu ứng suất và biến dạng có thể được sử dụng. Khi độ đàn hồi được sử dụng thì các kết quả sau cùng cũng được chuyển thành các ứng suất.

Các chi tiết đếm dòng mưa không nằm trong phạm vi của văn bản này nhưng rất cần thiết để đưa ra kĩ thuật dưới đây. Các điểm cao, điểm thấp trong dữ kiện được xác định là cực đại và cực tiểu. Khoảng cách giữa cực đại và cực tiểu và giữa mỗi cực đại, cực tiểu được xem là nửa vòng tròn. Thuật toán ghép đôi các nửa vòng tròn để tìm ra các vòng tròn hoàn chỉnh và kết hợp chúng.

Thuật ngữ “dòng mưa” có từ lĩnh vực giải thuật nhằm ở đây thì việc hoàn thiện của một chu trình giống như nhỏ giọt nước mưa từ mái (từ một đỉnh) và giao với các dòng nước chảy dọc mái khác (từ độ uốn dưới). Trong thuật toán, lịch sử của điểm cực đại và điểm cực tiểu tưởng tượng theo hướng thẳng đứng để “mưa” giảm dần với thời gian đang tăng lên. Một ví dụ về một vòng hoàn thiện được chỉ ra trong hình 4.15- hình này được suy ra từ hình 4.14. Mưa ở đây (được chỉ ra bằng các mũi tên) rơi xuống từ mái C-D gấp mưa rơi xuống từ mái E-F. Vòng C-D-R sẽ được triệt bỏ sau khi xem xét nhưng cực đại C được tích lại để sử dụng nhận biết các vòng tiếp theo. Trong trường hợp đặc biệt, điểm F sẽ di chuyển dần tới điểm B bên trái vì vậy vòng kín tiếp theo là B-C-F.

4.2.3.3 Các nguồn tải trọng mới của tuabin gió

Tải trọng thực tế sẽ tạo nên độ mới của tuabin gió bắt nguồn từ nhiều các nguồn khác. Nó bao gồm cả tải trọng cố định từ tuabin gió cao nhất và các tải trọng từ sự thay đổi của hướng gió, lỗi chỉnh hướng gió, chuyển động hướng gió, trọng lực và đặt tải ngẫu nhiên từ góc xoay; tải trọng tức thời từ gió giật, điểm xuất phát, điểm kết thúc... và các tải cộng hưởng từ độ rung của cấu trúc. Tất cả sẽ được thảo luận chi tiết ở chương này và chương 6.



Hình 4.15: Chu trình đếm dòng mura.

4.3 Động lực rõ to cánh quạt của tuabin gió

Khối lượng áp ché và sự tương tác động lực sẽ tạo ra lực và chuyển động trong các tuabin gió. Cần hiểu các tuabin gió trong quá trình thiết kế. Cần quyết định hiệu suất của các loại tải khác nhau này (tải tĩnh, tải trọng cố định, tải trọng theo chu kỳ, tải trọng ngắn hạn, tải xung và tải ngẫu nhiên). Trong phần này, cần xem xét hai phương pháp phân tích lực và truyền động của tuabin gió. Phương pháp thứ nhất thì sử dụng mô hình roto cố định với ý tưởng đơn giản để minh họa những khái niệm cơ bản về tải tuabin cố định. Phương pháp thứ hai bao gồm pháp mô hình động lực tuyến tính hóa cao của tuabin gió trực hành. Mô hình này được sử dụng để minh họa bản chất tuabin với các tải theo chu kỳ và tải trọng cố định. Một số mô hình động lực chi tiết được thảo luận ở phần cuối. Những mô hình này sẽ dự đoán chính xác tuabin phản ứng với các tải ngắn hạn và tải ngẫu nhiên nhưng cũng khá phức tạp.

4.3.1 Các tải trong roto lý tưởng

Tải roto quan trọng nhất trên tuabin là những tải kết nối với trực trên cánh quạt và lực xoắn dẫn động tới roto. Mô hình roto như một vật rắn đơn giản. Roto lý tưởng khí động rất hữu ích để nắm bắt các tải cố định trên một tuabin gió. Như được thảo luận ở chương khí động học (chương 3), khá dễ dàng để tìm ra nguyên lý tải khí động trên một roto lý tưởng thỏa mãn giới hạn Betz. Khi roto hoạt động theo hệ số công suất lý tưởng, tốc độ gió ở dòng đuôi bằng $1/3$ tốc độ gió ở dòng chảy tự do.

4.3.1.1 Lực đẩy

Như đã chỉ ở chương 3, lực đẩy T sẽ được tính theo phương trình sau đây:

$$T = C_T \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^2 \quad (4.3.1)$$

Trong đó C_T là hệ số lực đẩy, ρ là mật độ không khí, R là bán kính của roto và U là tốc độ gió ở dòng chảy tự do

Với trường hợp lý tưởng, thì $C_T = 8/9$. Về mô hình đơn giản, thì tổng lực đẩy trên roto biến thiên theo tốc độ gió bình thường.

4.3.1.2 Momen uốn và ứng suất

Momen uốn cánh quạt được thiết kế theo kiểu giáp cạnh (cạnh biên) và giáp đầu. Momen uốn giáp đầu làm các cánh quạt uốn theo chiều gió đang thổi. Momen giáp cạnh song song với trực roto và tăng lực sinh công. Chúng đôi khi còn được gọi là “lead-lag”.

Momen và lực dọc trực: Momen uốn giáp đầu ở gốc cánh quạt lý tưởng cuat tuabin với nhiều cánh được tạo ra bằng tích số của lực đẩy trên cánh quạt nhân với $2/3$ bán kính. Công thức này có thể thấy rõ ở dưới đây:

Xem xét các roto bao gồm một loạt các vòng đồng tâm với chiều rộng là dr , gốc momen uốn giáp đầu M_β cho 1 tuabin với các cánh quạt B :

$$M_\beta = \frac{1}{B} \int_0^R r \left(\frac{1}{2} \rho \pi \frac{8}{9} U^2 2r dr \right) \quad (4.3.2)$$

Dựa vào các thuật ngữ thu thập và tích hợp lại ta có kết quả:

$$M_\beta = \frac{T}{B} \frac{2}{3} R \quad (4.3.3)$$

Áp suất mặt phẳng tối đa là $\sigma_{\beta, max}$ do độ uốn ở đê được đưa ra ở phương trình 4.2.3:

$$\sigma_{\beta, max} = M_\beta c / I_b \quad (4.3.4)$$

Ở đây c là khoảng cách giữa đường trung hòa mặt phẳng và I_b là momen tịnh của lực quán tính của bộ phận cánh quạt ở đê.

Nên lưu ý rằng thuật ngữ trong các bệ đỡ của phương trình 4.3.2 là giống như lực dọc gia tăng được sử dụng ở chương 3. Chỉ số dưới I_b : góc lệch của cánh quạt trong định hướng mặt phẳng, chỉ số này được sử dụng để nhấn mạnh tính liên tục các biểu thị trong mô hình lò xo khớp nối động học được thảo luận ở phần tiếp.

Lực cắt S_β trong gốc cánh quạt là lực đẩy được chia ra do một số các cánh quạt:

$$S_\beta = T / B \quad (4.3.5)$$

Tóm lại, với một roto lý tưởng thì lực uốn và ứng suất biến thiên với bình phương tốc độ gió và không phụ thuộc vào vị trí góc cánh quạt (phương vi). Hơn nữa, các roto được thiết kế với hoạt động tỷ lệ tốc độ đầu cánh cao hơn thì có những cánh quạt nhỏ hơn vì vậy chúng có thể hoạt động với ứng suất phẳng cao hơn.

Momen và lực biên: Như đã đề cập ở bên trên, momen giáp cạnh làm tăng lực sinh công. Về chiều dài của cánh quạt, momen giáp cạnh (biên) thông thường không quan trọng bằng các bản sao của nó. Lực mô men xoắn trung bình Q là là công suất được phân chia bởi tốc độ quay. Với roto lý tưởng được trình bày ở chương 3 thì lực được tính theo công thức sau:

$$Q = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{\Omega} \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3 = \frac{8}{27} \rho \pi R^2 \frac{U^3}{\Omega} \quad (4.3.6)$$

Trong trường hợp tổng quát thì lực có thể được biểu diễn theo một hệ số lực mô men xoắn $C_Q = C_P / \lambda$ (hệ số công suất được phân chia bởi tỷ lệ tốc độ đầu cánh) theo công thức:

$$Q = C_Q \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^2 \quad (4.3.7)$$

Với roto lý tưởng, tốc độ quay thay đổi cùng với tốc độ gió, vì vậy lực biến thiên với bình phương tốc độ gió. Hơn nữa, các roto được thiết kế với hoạt động tỷ lệ tốc độ đầu cánh cao hơn có hệ số lực thấp hơn, vì vậy theo mô hình đơn giản thì lực không biến thiên với phương vị của cánh quạt.

Momen biên: Lực uốn trong hướng biên (được biểu thị bằng ζ) ở đế cánh quạt đơn M_ζ là lực được phân chia bởi một số các cánh quạt :

$$M_\zeta = Q / B \quad (4.3.8)$$

Không có mối quan hệ đồng vị cho lực cắt biên S_ζ nhưng có thể tìm thấy tích hợp lực tiếp tuyến đã được thảo luận ở chương 3:

$$S_\zeta = \int_0^R dF_T \quad (4.3.9)$$

4.3.2 Mô hình roto cánh quạt lò xo bắn lè tuyến tính.

Động lực học tuabin gió thực tế có thể khá phức tạp. Các tải có thể thay đổi và cấu trúc có thể di chuyển nhiều hướng-điều này có ảnh hưởng tới các tải. Để phân tích tất cả các ảnh hưởng tương tác này thì cần sử dụng các mô hình toán học chi tiết. Tuy nhiên tìm hiểu bên trong sự vật bằng cách xem xét mô hình đơn giản hóa của roto và kiểm tra các mô hình này để đáp ứng các tải đơn giản. Phương pháp này được mô tả dưới đây dựa trên định luật của Eggleston và Stoddard (1987). Mô hình này cung cấp việc tìm hiểu bên trong sự vật không chỉ bên trong tuabin đáp lại các tải cố định mà còn ở các tải chu kỳ.

Mô hình đơn giản hóa được biết như mô hình roto cánh quạt lò xo bắn lè hay nói tắt là mô hình lò xo bắn lè. Bản chất của mô hình chứa các chi tiết hữu dụng nhưng nó lại rất đơn giản để đưa ra các nghiệm giải tích. Bằng cách kiểm tra các nghiệm thì có thể phân biệt vài nguyên nhân cũng như hậu quả nổi bật của chuyển động tuabin gió. Mô hình lò xo bắn lè bao gồm 4 phần cơ bản: (1) một mô hình của mỗi cánh quạt như một vật rắn gắn liền với một trục bánh xe bằng các bắn lè và lò xo (2) trạng thái bền vững tuyến tính, mô hình khí học dòng chảy đều (3) cần xem xét dòng chảy không đều như “sự nhiễu” và (4) dạng sin giả thiết cho các nghiệm.

4.3.2.1 Các loại chuyển động cánh quạt

Mô hình lò xo bắn lè cho phép ba hướng chuyển động của cánh quạt và lắp bắn lè và lò xo cho tất cả các mô hình này. 3 hướng chuyển động nhờ vào các bắn lè đó là i “cạnh biên”, ii “lead-lag”, iii “độ xoắn”. Các lò xo giúp các cánh quạt về vị trí “bình thường” trên trục bánh.

Như được đề cập ở bên trên thì cánh treo ám chỉ đồng thời chuyển động trên trục quay của roto. Với một roto thẳng với hướng gió, thì cánh treo có thể nằm theo hướng gió hoặc ngược với hướng gió. Lực đẩy trong hướng cánh treo đặc biệt quan trọng vì ứng suất lớn nhất ở các cánh quạt là do độ uốn của mặt phẳng.

Chuyển động lead-lag nằm trong mặt phẳng chuyển động. Nó ám chỉ chuyển động có liên quan tới chuyển động quay của cánh quạt. Trong chuyển động chính của cánh quạt có thể di chuyển nhanh hơn tốc độ quay toàn phần và trong lực và chuyển động chậm thì kết hợp với biến thiên của lực trong trục chính và biến thiên với công suất từ máy phát.

Chuyển động xoắn là nói đến chuyển động ở trục bên. Với trục cố định của chuyển động xoắn trong tuabin gió nói chung là không phải là phần quan trọng nhất. Trong chuyển động xoắn của tuabin gió với trục thay đổi có thể gây ra tải trọng dao động trong cơ chế kiểm soát trực.

Trong phần phát triển dưới đây, chủ yếu tập trung vào chuyển động cánh tà. Chi tiết của lead-lag và của chuyển động xoắn có thể tìm thêm trong sách của Eggleston và Stoddard (1987).

4.3.2.2 Các nguồn tải

Mô hình lò xo bắn lè được phát triển dưới đây bao gồm phân tích roto phản ứng như thế nào với 6 nguồn tải.

- Quay roto
- Trọng lực
- Tỷ lệ chỉnh hướng gió ổn định
- Gió ổn định
- Lỗi lắc ngang
- Sự thay đổi hướng gió tuyến tính

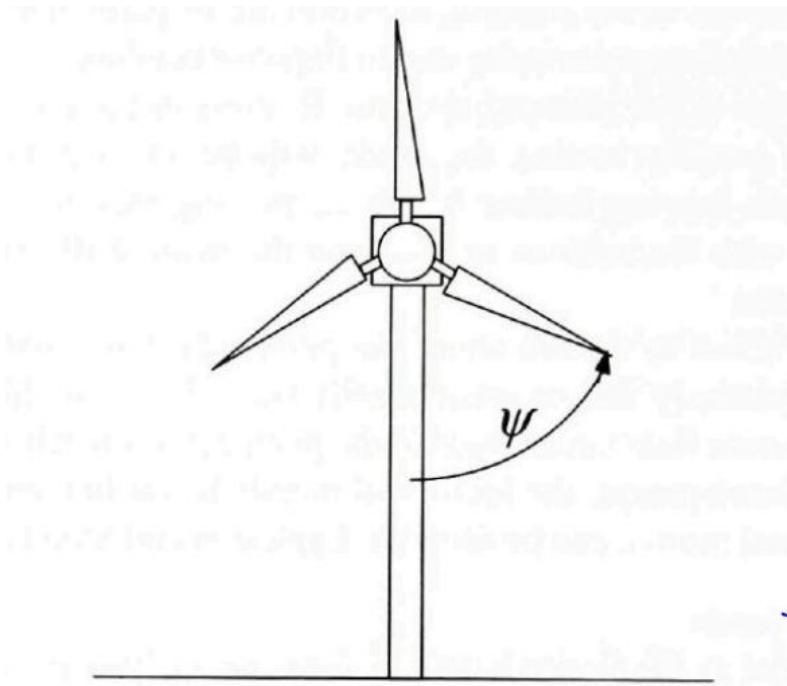
Những tải này có thể được áp dụng tách biệt hoặc kết hợp với nhau. Những phân tích này sẽ cung cấp các giải quyết chung cho bộ đáp roto mà chức năng làm phương vị của cánh quạt và vị trí góc quay của cánh quạt. Cách giải quyết này gồm có 3 điều kiện: thứ nhất là độc lập với vị trí phương vị, thứ hai là một chức năng của vị trí định vị hình sin và thứ 3 là một chức năng của vị trí phương vị hình cosin. Phát triển này được chia thành 2 phần (i) chuyển động tự do, (ii) chuyển động cưỡng bức. Chuyển động tự do bao gồm ảnh hưởng của trọng lực và phép xoay. Chuyển động cưỡng bức bao gồm gió không đổi và lắc ngang ổn định. Độ lệch từ gió không đổi (lỗi lắc ngang, thay đổi hướng gió) được xem là sự rối loạn gió không đổi.

4.3.3.3 Hệ tọa độ cho mô hình.

Các phần sau đây sẽ mô tả hệ tọa độ được sử dụng trong phân tích mô hình, phát triển mô hình cánh lò xo bắn lè và suy ra các phương trình chuyển động của cánh quạt lò xo bắn lè cho các trường hợp chuyển động biên. Phần này sẽ tập trung phân tích hệ tọa độ được sử dụng trong mô hình này.

Phát triển các tuabin gió trực hành. Hình 4.16 minh họa tuabin gió điển hình được ứng dụng trong mô hình này. Trong hình này và trong những phần phát triển dưới đây, giả sử tuabin có roto theo hướng gió và có 3 cánh. Trong trường hợp này, người quan trắc đang nhìn ngược hướng gió. Tuy nhiên cần lưu ý rằng mô hình này có thể được ứng dụng với một tuabin ngược gió và với một tua bin có 2 cánh.

Các yếu tố ảnh hưởng tới chuyển động tự do được xem ở đây bao gồm (i) hình dạng, (ii) tốc độ quay (iii) khối lượng cánh quạt. Các ảnh hưởng của ngoại lực tới chuyển động cánh quạt sẽ được thảo luận sau:



Hình 4.16: Tuabin điển hình thích hợp với mô hình lò xo bắn lè

Mô hình này được mở rộng thêm ở dưới đây bao gồm một số các giả định liên quan đến mỗi cánh quạt. Bao gồm:

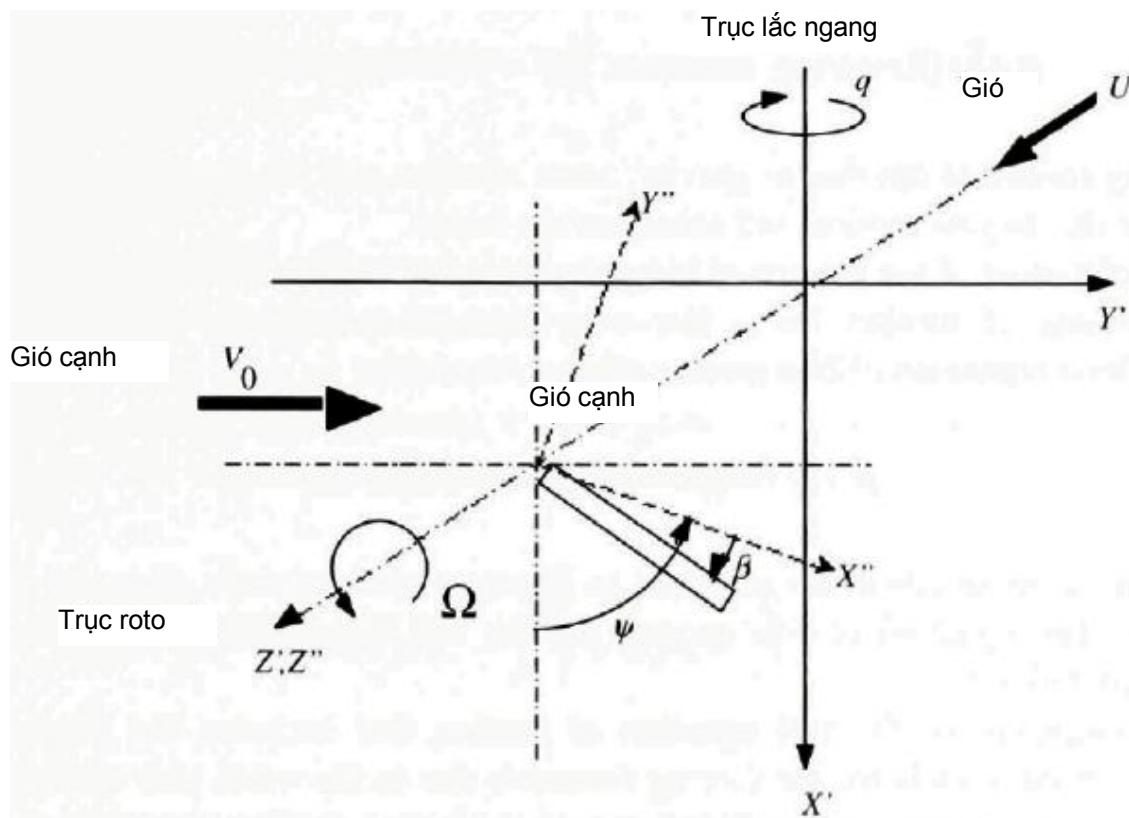
- Cánh quạt có mặt cắt đều
- Cánh quạt cứng
- Bản lề cánh quạt có thể lệch với trục quay
- Khi quay, tốc độ quay không thay đổi

Khai thác thêm độ cứng và độ lệch của lò xo bản lề thích hợp cho mô hình sẽ được thảo luận ở phần này.

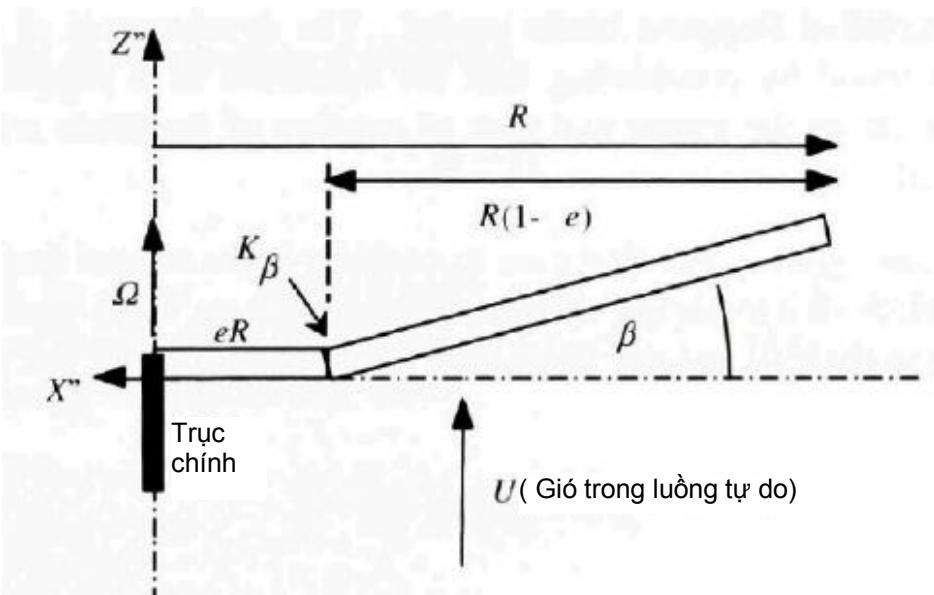
Hình 4.17 minh họa hệ tọa độ cho mô hình này tập trung vào một cánh quạt. Như được chỉ ở đây thì hệ tọa độ X' , Y' , Z' được xác định bởi tuabin trong khi X , Y , Z là cố định với mặt đất. Trục X dọc theo cột, trục Z là trục quay của roto và trục Y vuông góc với X , Z . Các trục X'' , Y'' , Z'' quay quanh roto. Trong trường hợp cánh quạt được nói thì X'' thẳng hàng với cánh quạt nhưng nằm trong mặt phẳng của phép xoay. Cánh quạt này nằm ở góc định vị ψ với trục X'' . Cánh quạt nằm ngoài mặt phẳng của phép

xoay do góc cánh tà β . Hình này phản ánh một giả thiết về hướng quay của roto cũng như lắc ngang nhất quán với định luật tay phải về cực dương của trục X , Y , Z . Đặc biệt khi nhìn hướng ngược gió, roto quay theo chiều kim đồng hồ.

Hình 4.18 Chỉ ra hình chiếu bằng của một cánh quạt đã quay ở điểm cao nhất (phương vị của đơn vị góc π). Đặc biệt, nhìn dọc trục Y''



Hình 4.17: Hệ tọa độ cho mô hình lò xo bản lề. q : tần số lắc ngang U : vận tốc gió trong luồng tự do V_0 ; vận tốc gió cạnh Ω ; vận tốc góc (Eggleston và Stoddard, 1987). Tái sản xuất dưới sự cho phép của nhà xuất bản Plenum/ Kluwer Academic.



Hình 4.18: Định nghĩa mô hình lò xo bắn lề, e : độ lệch bắn lề không thử nguyên, K_β hằng số lò xo ở cánh tà, R : bán kính của roto, U : vận tốc gió trong luồng tự do, Ω vận tốc góc.

4.3.3.4 Mở rộng mô hình cánh quạt gấp.

Mô hình động lực này sử dụng cánh quạt lệch và có bắn lề để miêu tả cánh quạt thực. Lựa chọn độ cứng của lò xo và độ lệch nhỏ để cánh quạt lò xo và bắn lề quay có tần số tự nhiên giống nhau và quán tính vành lề như cánh quạt thực. Trước đó, chúng tôi cũng đã cung cấp các chi tiết của mô hình cánh quạt lệch lò xo bắn lề, và kiểm tra động lực học của cánh quạt treo bắn lề đơn giản. Như được đề cập ở trên đây, phần này tập trung vào chuyển động cánh tà không nghiêng để minh họa cho mô hình này.

Nhìn chung, thì các đặc tính va đập của cánh quan được miêu tả trong một phương trình khác với các hệ số không đổi:

$$\ddot{\beta} + [f(\text{các mô men phục hồi})] \beta = g(\text{các mô men lực})$$

Các momen phục hồi là do trọng lực, độ quay của roto và lò xo bắn lề. Các momen lực là nhờ vào chuyển động lắc ngang và sức lực động lực học.

Phát triển mô hình roto lò xo bắn lề tuyến tính bắt đầu bằng cách mở rộng các phương trình chuyển động cho một số mô hình cánh quạt đơn giản, giả sử nếu không có các hàm cưỡng bức. Các phương trình này của chuyển động tự do có dạng:

$$\ddot{\beta} + [f(\text{các mô men phục hồi})] \beta = 0$$

Các nghiệm của những phương trình này được sử dụng để minh họa các phản ứng động lực của các cánh quạt roto. Sau đây sẽ mô tả và rút ra phương trình chuyển động tự do trong mô hình cánh quạt lò xo ban lề.

Phát triển phương trình chuyển động bao gồm các momen lực cần có các mô hình tuyến tính cho các momen lực nhờ vào gió, chuyển động lắc ngang, độ lệch lắc ngang và thay đổi vận tốc gió đột ngột. Phương trình chuyển động đầy đủ có thể được kết hợp. Phương trình này được chuyển sang một phương trình đơn giản hơn để giải quyết. Công thức cuối cùng sử dụng góc phẳng đóng vai trò như một góc phương vị.

Động lực học của mô hình cánh quạt va đập nhẹ: Mở rộng mô hình lò xo bắn lề được hiểu theo cách dễ nhất bằng cách xem xét động lực học của cánh va đập mà không có độ lệch. Dưới đây là xem xét những ảnh hưởng của lò xo và ảnh hưởng của độ xoay của cánh quạt có và không có lò xo.

Lò xo, không xoay, không lệch: Trường hợp đầu tiên xem xét là là tần số tự nhiên của hệ thống cánh quạt lò xo bắn lề không quay. Tương tự với độ rung lò xo - khói (xem ở phần 4.2), tần số tự nhiên không xoay cho độ rung của bắn lề thả cánh tà được tính từ công thức:

$$\ddot{\beta} = -\left(K_\beta / I_b\right)\beta \quad (4.3.10)$$

Ở đây I_B là momen quán tính khồi của cánh quạt về trục va đập và K_β là hằng số lò xo bắn lè và đập.

Tần số va đập tự nhiên của cánh quạt không quay ω_{NR} được tính theo công thức:

$$\omega_{NR} = \sqrt{K_\beta / I_b} \quad (4.3.11)$$

Từ một trong những giả thiết là cánh quạt có mặt cắt đều, momen quán tính khồi của cánh quạt: m_8 (không lệch) là:

$$I_b = \int_0^R r^2 dm = \int_0^R r^2 (m_B / R) dr \quad (4.3.12)$$

Vì vậy

$$I_b = m_B R^2 / 3 \quad (4.3.13)$$

Độ xoay, không lò xo, không lệch. Khi cánh quạt đang quay với một bắn lè trên trục quay mà không có lò xo. Tần số tự nhiên mặt phẳng giống như tốc độ quay. Có thể thấy ở dưới đây. Lực phục hồi là lực quán tính ly tâm F . Đại lượng của nó tỉ lệ thuận với bình phương tốc độ và cosin của góc phẳng. Thành phần phục hồi được quyết định bởi sin của góc phẳng.

Vì vậy:

$$I_b \ddot{\beta} = \int [-r \sin(\beta)] dF_c = \int_0^R [r \cos(\beta) \Omega^2] [-r \sin(\beta)] \rho_{blade} dr \quad (4.3.14)$$

Giả sử các góc nhỏ là $\cos(\beta) \approx 1$ và $\sin(\beta) \approx \beta$ thì

$$\ddot{\beta} = -\left(\Omega^2 / I_b\right) \beta \int_0^R r^2 dm = -\Omega^2 \beta \quad (4.3.15)$$

Nghiệm của phương trình trên hiển nhiên là:

$$\omega = \Omega \quad (4.3.16)$$

Độ xoay, lò xo, không lệch: Khi một cánh quạt không có độ nghiêng được lắp bắn lè và cũng bao gồm một lò xo, thì tần số tự nhiên sẽ được quyết định nhờ vào tổng các kết quả của lò xo và đập số quay. Phương trình thích hợp là:

$$\ddot{\beta} + \left(\Omega^2 + K_\beta / I_b\right) \beta = 0 \quad (4.3.17)$$

Nghiệm của phương trình này đã thể hiện ở thảo luận trên

$$\omega_R^2 = \omega_{NR}^2 + \Omega^2 \quad (4.3.18)$$

Ở đây thì ω_R là tần số quay tự nhiên và ω_{NR} là tần số tự nhiên không quay.

Như đã thấy, tần số quay tự nhiên cao hơn tần số tự nhiên quay lắp với lò xo. Vì vậy có thể nói rằng độ xoay “gia cố” cánh quạt.

Độ xoay, lò xo, độ lệch. Nói chung, một cánh quạt thực không hoạt động nếu nó có một lò xo bắn lè ở trục quay. Vì vậy:

$$\omega_R^2 \neq \omega_{NR}^2 + \Omega^2 \quad (4.3.19)$$

Để làm mô hình chính xác các chuyển động của cánh quạt cần được biểu diễn thích hợp, với động lực học của cánh quạt được biểu diễn bằng ω_R và ω_{NR} . Mô hình này được hoàn tất bằng bản lề lệch. Tất cả các giá trị bất biến của mô hình lò xo bắn lè có thể đánh giá được nếu biết tần số tự nhiên của cánh quạt thực quay và không quay. Phương pháp sau đây được mô tả trong cuốn sách của Eggleston và Stoddard (1987), phương pháp này chỉ độ lệch không thứ nguyên bằng công thức:

$$e = 2(Z - 1) / [3 + 2(Z - 1)] \quad (4.3.20)$$

$$\text{Ở đây thì } Z = (\omega_R^2 - \omega_{NR}^2) / \Omega^2$$

Thêm vào đó thì độ lệch được đến bằng cách điều chỉnh momen quán tính. Momen quán tính khôi của cánh quạt được đóng bản lề xấp xỉ bằng:

$$I_b = m_B (R^2 / 3) (1 - e)^3 \quad (4.3.21)$$

Hằng số lò xo cánh tà:

$$K_\beta = \omega_{NR}^2 I_b \quad (4.3.22)$$

Lưu ý rằng các tần số tự nhiên có quay và không quay có thể được tính toán nhờ phương pháp Myklestad như đã miêu tả ở trước hay từ những dữ liệu thực nghiệm nếu nó có sẵn.

Vì vậy, các đặc điểm cánh treo của cánh quạt được mô hình hóa bằng một cánh quạt đồng dạng được treo với một bản lề lệch và một lò xo có một mức độ tự do và đáp ứng trong cùng phương thức với các lực như mô hình rung thứ nhất của cánh quạt thực. Các hằng số tương tự sẽ quyết định cho chuyển động lead-lag của cánh quạt thực. Độ xoắn không đòi hỏi có một mô hình lò xo lệch nhưng nó cần có một sự cố định/hằng số cho độ cứng. Với tất cả các hằng số của mô hình cánh quạt cho ba mức tự do, phẳng, lead-lag và độ xoắn.

Phương trình chuyển động của mô hình cánh quạt của roto chuyển động lên xuống tự do khi có trọng lực và độ lệch

$$\ddot{\beta} + [\Omega^2(1 + \varepsilon) + G \cos(\psi) + K_\beta / I_b] \beta = 0 \quad (4.3.23)$$

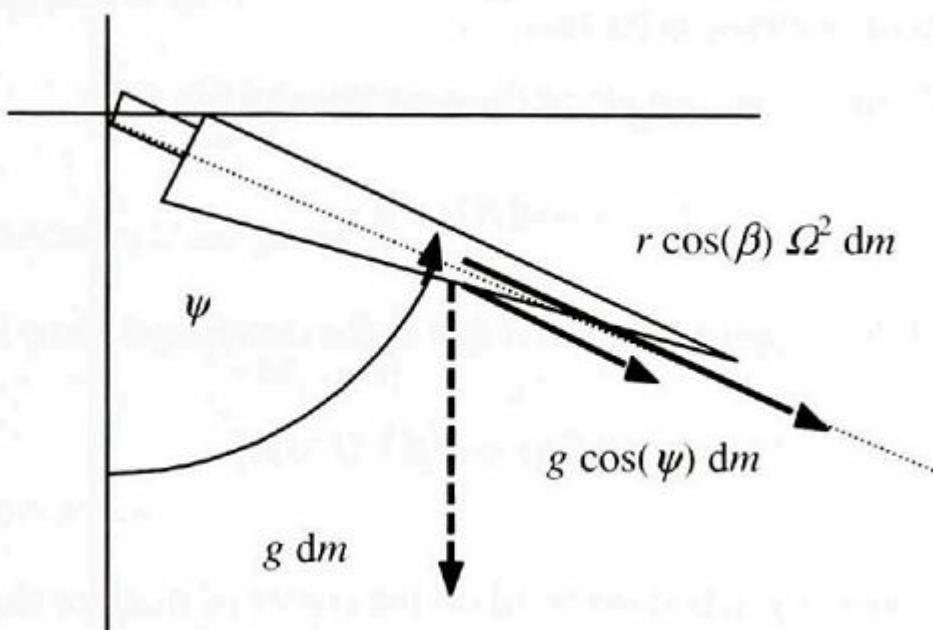
Trong đó thì G là trọng lực được tính theo: $G = gm_B r_g / I_b$, r_g và khoảng cách theo bán kính với trung tâm của khôi và ε là kí hiệu của độ lệch được tính theo $\varepsilon = 3e / [2(1 - e)]$ và ω là góc định vị.

Dẫn xuất của phương trình chuyển động lên xuống sẽ được nói tới ở phần sau:

4.3.3.5 Dẫn xuất của phương trình chuyển động lên xuồng (tự do)

Sự dịch chuyển lên xuồng trong cánh quạt roto được chỉ ra trong hình 4.19 được nhìn theo hướng ngược gió (ở trong hình 4.17). Cánh quạt không nằm trong mặt phẳng quay, nó nằm theo hướng người nhìn với một góc dịch chuyển lên xuồng là β . Trục dọc của cánh quạt nghiêng xiên với một góc phương vị ψ . Lưu ý rằng phương vị bằng không tương đương với đầu mút là cánh quạt chỉ hướng đi xuồng. Góc phương vị tăng theo hướng quay. Góc di chuyển lên xuồng dương theo hướng ngược gió. Lưu ý rằng trong thảo luận dưới đây có nhiều thiết bị đầu vào biến đổi theo góc định vị cosin và sin. Chúng ta còn có thể gọi là các chu trình, cụ thể hơn là chu trình sin và chu trình cosin. Sau đây là các thiết bị chu trình đầu vào có liên quan bộ đáp chu trình tuabin.

Trong hình 4.19, hai lực tác động dọc theo trục cánh quạt trên một bộ phận của cánh quạt với khối lượng dm . Lực li tâm phụ thuộc vào bình phương tốc độ quay và khoảng cách tới trục quay. Cầu tạo trọng lực do trọng lượng của cánh quạt phụ thuộc vào góc định vị.



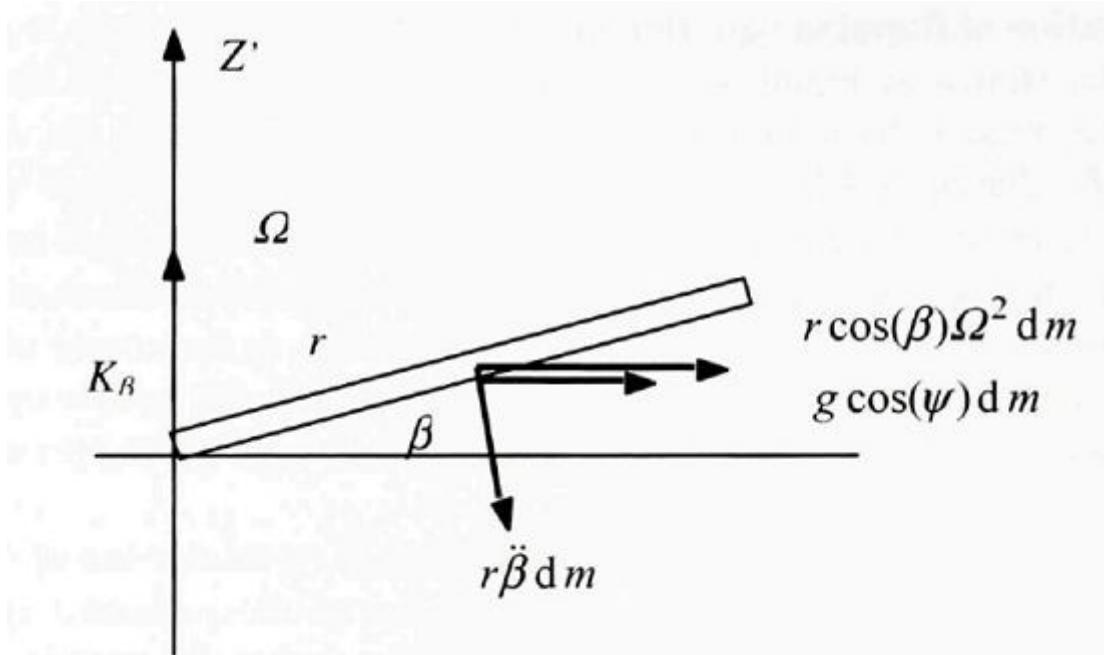
Hình 4.19: Di chuyển lên xuồng của cánh quạt trong roto được nhìn theo hướng ngược gió: g là lực hấp dẫn; m là khối lượng, r là khoảng cách theo bán kính từ trục quay, β là góc dịch chuyển lên xuồng, ω là tốc độ quay, ψ : góc phương vị.

Phát triển phương trình chuyển động của cánh quạt di chuyển lên xuồng mà không có độ lệch phụ thuộc vào lực phục hồi nhờ lực quán tính, lò xo ban lề, trọng lực, độ xoay. Phương trình chuyển động được phát triển với độ lệch không có được đưa ra ở đây, nhưng hai phương trình này tương tự như nhau.

Hình 4.20 minh họa cánh quạt được nhìn từ trên xuồng. Hình vẽ này bao gồm hằng số lò xo di chuyển lên xuồng và gia tốc di chuyển lên xuồng.

Dưới đây sẽ tóm tắt các ảnh hưởng của các lực khác nhau. Như đã được đề cập ở bên trên, ban đầu thì chúng ta sẽ không quan tâm đến sự ảnh hưởng về độ lệch ban lề của cánh quạt.

Lực li tâm: Lực li tâm để đưa cánh quạt di chuyển lên xuồng về mặt phẳng xoay. Như đã được bắt đầu ở bên trên, đại lượng của nó phụ thuộc vào bình phương tốc độ quay và không phụ thuộc vào phương vị của cánh quạt. Lực li tâm hoạt động nhờ vào trung tâm khối của cánh quạt, vuông góc với trục quay của roto.



Hình 4.20: Cánh quạt di chuyển lên xuông được nhín từ phía trên (Eggleston và Stoddard, 1987).
Tái sản xuất dưới phép của nhà xuất bản Plenum/ Kluwer Academic.

Như đã chỉ ra trong hình thì đại lượng của lực ly tâm F là:

$$F_c = r \cos(\beta) \Omega^2 dm \quad (4.3.24)$$

Momen của trục bắn lè lên xuông là nhờ vào lực ly tâm được tính theo công thức:

$$M_c = r \sin(\beta) [r \cos(\beta) \Omega^2 dm] \quad (4.3.25)$$

Lực hấp dẫn: Trọng lực hoạt động theo hướng đi xuống với trung tâm khối của cánh quạt. Khi cánh quạt di chuyển đi lên, thì trọng lực gia tăng trong góc di chuyển lên xuông/ cánh tà. Khi đi xuống thì trọng lực giảm. Lực hấp dẫn không phụ thuộc vào tốc độ quay.

Đại lượng của lực hấp dẫn được kí hiệu là F_g , được tính theo công thức:

$$F_g = g \cos(\psi) dm \quad (4.3.26)$$

Khi lực hấp dẫn thay đổi theo cosin phương vị thì có thể nói nó là chu trình cosin.

Momen phục hồi do lực hấp dẫn phụ thuộc vào góc sin lên xuông . Đại lượng của nó là:

$$M_g = r \sin(\beta) [g \cos(\psi) dm] \quad (4.3.27)$$

Lực lò xo bắn lè. Lò xo bắn lè tạo ra một momen M ở bắn lè. Đại lượng tỉ lệ thuận với góc lên xuông. Lò xo làm giúp cánh quạt nằm ở mặt phẳng bắn lè trong trường hợp này có thể nói là mặt phẳng quay.

Đại lượng của momen lò xo bắn lè là:

$$M_s = K_\beta \beta \quad (4.3.28)$$

Gia tốc: Lực quán tính gia tốc cánh tà tạo ra nhờ khối dm được đưa ra bởi gia tốc góc trong hướng lên xuồng $\ddot{\beta}$, tăng lên do khoảng cánh từ trực di chuyển lên xuồng. Momen nhờ lực này M_1 , là kết quả của lực quán tính và khoảng cách. Nói cách khác nó được tính theo công thức:

$$M_f = r^2 \ddot{\beta} dm \quad (4.3.29)$$

Gia tốc khối dm là kết quả của tổng momen. Không có ngoại lực thì tổng bằng không:

$$\sum M = M_f + M_c + M_g + M_s = 0 \quad (4.3.30)$$

Công thức tổng quát cho cánh theo hàm nguyên:

$$\int_o^R (M_f + M_c + M_g) + M_s = 0 \quad (4.3.31)$$

Mở rộng công thức này được tính như sau:

$$\int_0^R \left[r^2 \ddot{\beta} + r \cos(\beta) r \sin(\beta) \Omega^2 + rg \cos(\psi) \sin(\beta) \right] dm + K_\beta \beta = 0 \quad (4.3.32)$$

Momen quán tính khối của cánh quạt được tính như sau: $I_b = \int_0^R r^2 dm$ Khối và khoảng cách đến trung tâm khối r_g có liên quan ở công thức:

$$\int_0^R r dm = m_B r_g \quad (4.3.33)$$

Vì vậy, chúng ta có:

$$I_b \ddot{\beta} + I_b \cos(\beta) \sin(\beta) \Omega^2 + g \cos(\psi) \sin(\beta) m_B r_g + K_\beta \beta = 0 \quad (4.3.34)$$

Sử dụng tiệm cận/ xấp xỉ góc nhỏ cho β , coi là “hạn lực hấp dẫn”: $G = gm_B r_g / I_b$ và chúng ta có:

$$\ddot{\beta} + [\Omega^2 + G \cos(\psi) + K_\beta / I_b] \beta = 0 \quad (4.3.35)$$

Lưu ý rằng nó cũng giống như những gì đã được thảo luận ở phía trên (theo phương trình 4.3.23).

Nhớ lại thì mô hình cánh quạt có một đường cắt đều, mà chúng ta có thêm độ lệch e và xác định một độ lệch ε:

$$\varepsilon = m_B e r_g R / I_b = 3e / [2(1-e)] \quad (4.3.36)$$

Khi phân tích cả độ lệch, thì phương trình di chuyển lên xuống cuối cùng sẽ là :

$$\ddot{\beta} + [\Omega^2(1+\varepsilon) + G \cos(\psi) + K_\beta / I_b] \beta = 0 \quad (4.3.37)$$

Kết quả trên đã được chứng minh.

4.3.3.6 Các phương trình chuyển động

Phần này sẽ phát triển phương trình chuyển động của cánh quạt bằng cách xem xét ảnh hưởng của các hàm cưỡng bức, chuyển động lắc ngang và tốc độ gió.

Chuyển động lắc ngang: Chuyển động lắc ngang được tạo ra nhờ các momen hồi chuyển hoạt động trên cánh quạt. Bằng cách phân tích giống như công thức được đưa ở phần 4.2.1.5, thì phương trình này đã chỉ ra momen hồi chuyển trong hướng di chuyển lên xuống do chuyển động lắc ngang cân bằng với tỉ lệ q theo phương trình:

$$M_{yaw} = -2q\Omega \cos(\psi)I_b \quad (4.3.38)$$

Các tác động của gió: Mô hình khí động học tuyến tính: tác động của gió làm chuyển động cánh quạt được kết hợp thông qua mô hình khí động học tuyến tính. Mô hình này going như mô hình được phát triển trong phần khí động học của văn bản này, ngoài ra nó còn bao gồm cả những giả thuyết đơn giản. Mô hình khí động được phát triển trong chương 3 phù hợp với đánh giá hoạt động, nhưng nó cũng khá phức tạp khi ứng dụng trong phân tích động học giản đơn. Ngược lại, những phân tích trước đây chỉ xem xét dòng hướng tâm, và ổn định trong đó bao gồm cả gió chuyển động ngọt theo chiều dọc tuyến tính, gió cạnh và các lỗi lắc ngang. Cũng nên lưu ý rằng trong mô hình động lực đa dụng, mô hình khí động học cần phải đưa ra rất chi tiết. Cuối cùng, lực cản mô hình khí động học tuyến tính được bỏ qua.

Mô hình khí động học tuyến tính bao gồm nguyên lý tuyến tính lực nâng trên cánh quạt và một đặc điểm tuyến tính của các thành phần tuyến tính và trực của gió trong roto (theo thứ tự là U_r và $U_{R''}$). Lực nâng là một đặc trưng của hai thành phần này lần lượt là U_r và $U_{R''}$ -bao gồm cả tốc độ gió trung bình, tốc độ lên xuống của cánh quạt, tỷ lệ lắc ngang, gió cạnh và thay đổi hướng gió đột ngột. Phương trình lực di chuyển lên xuống sinh ra từ lực nâng sẽ được mở rộng thêm sau khi giải thích đầy đủ mô hình khí động học.

Thảo luận sau được sử dụng cho độ nâng trên một đơn vị chiều dài \tilde{L} khi biến dạng cánh. Dẫn xuất của phương trình được phát triển sau đây được bắt nguồn từ các nguyên lý được trình bày ở chương 3.

$$\tilde{L} = \frac{1}{2} \rho c C_{IA} (U_p U_T - \theta_p U_T^2) \quad (4.3.39)$$

Ở đây thì c là độ dài dây cung, C_{IA} là độ dốc đường cong lực nâng, U_r là tốc độ gió vuông góc với mặt phẳng của roto, U_p là tốc độ gió tiếp xúc với thành phần của cánh quạt và θ_p là góc chao dọc.

Các phương trình cho các thành phần tốc độ gió bao gồm cả dòng trục, tỷ lệ tẩm lật, lối lắc ngang, tính thay đổi vận tốc đột ngột của gió. Các phương trình cho các thành phần này sẽ được phát triển ở dưới đây. Các thành phần tốc độ là:

$$U_p = U(1-a) - r \ddot{\beta} - (V_0 \beta + qr) \sin(\psi) - U(r/R) K_{vs} \cos(\psi) \quad (4.3.40)$$

$$U_T = \Omega r - (V_0 + qd_{yaw}) \cos(\psi) \quad (4.3.41)$$

Ở đây U là vận tốc gió dòng chảy tự do, a là cảm ứng trực, V_0 là vận tốc gió cạnh (do độ lệch lắc ngang). K_m là hệ số thay đổi hướng gió đột ngột và d_{yaw} là khoảng cách từ mặt phẳng roto tới trục lắc ngang.

Phát triển mô hình khí động học tuyến tính: Phần này phát triển mô hình khí động học như đã trình bày ở trên. Đầu tiên, mô hình này được phát triển cho gió thổi dọc trục. Độ lệch của gió ổn định (nhờ vào độ lệch lắc ngang, chuyển động lắc ngang và thay đổi vận tốc gió đột ngột) được xem xét ở dưới đây như các nhiễu loạn trên tuabin gió này.

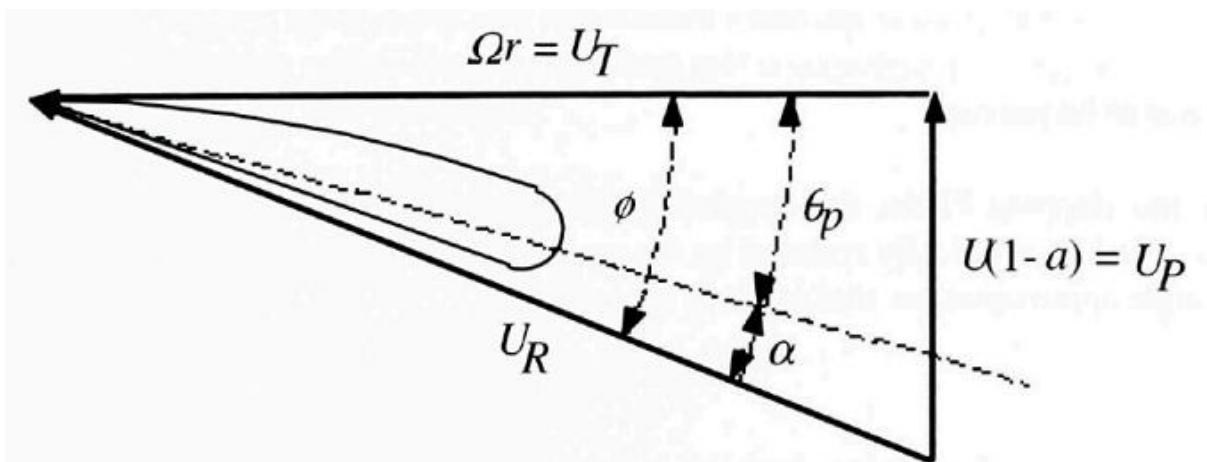
Phát triển mô hình khí động học tuyến tính tham khảo ở hình 4.21

Hơn nữa thì các biến đổi được nêu ra ở phía trước, và sử dụng các cách gọi tên sau đây:

θ là góc gió tỷ đối $= \tan^{-1}(U_p / U_T)$

α là góc tới

Ur là gió tương đối $= \sqrt{U_p^2 + U_T^2}$



Hình 4.21: Các cách gọi cho mô hình khí động tuyến tính α là cảm ứng trực, r là khoảng cách bán kính từ trục quay, U là tốc độ gió tương đối, U_p và Ur lần lượt là phần vuông góc và tiếp xung với vận tốc gió, Ω là vận tốc góc.

Phản mở rộng dựa vào các giả thuyết sau đây:

- Tốc độ quay tương đối cao so với tốc độ gió và vì vậy $Ui >> Up$
- Đường cong lực nâng tuyến tính và đi qua không vì vậy mà $C_l = C_{l\alpha} \alpha$ ở đây thì $C_{l\alpha}$ là độ dốc đường cong lực nâng.
- Góc tới nhỏ
- Sử dụng giả thiết góc nhỏ
- Không có quay dòng đuôi

- Cánh quạt có dây không đổi và không có độ xoắn (mặc dù mô hình này được mở rộng bao gồm cả dây thay đổi và có độ xoắn cánh quạt).

Dòng trực: Đưa ra giả thiết về đường cong lực nâng và sử dụng các mối quan hệ trong chương 3, độ nâng theo chiều dài đơn vị của biến dạng cánh là:

$$\tilde{L} = \frac{1}{2} \rho c C_l U_R^2 \approx \frac{1}{2} \rho c C_{l\alpha} U_R^2 \alpha \quad (4.3.42)$$

Sử dụng tiệm cận/ xấp xỉ của góc nhỏ , góc $\tan^{-1}(angle) \approx angle$

$$\alpha = \phi - \theta_P = \tan^{-1}(U_P / U_T) - \theta_P \approx U_P / U_T - \theta_P \quad (4.3.43)$$

Vì vậy:

$$\tilde{L} = \frac{1}{2} \rho c C_{l\alpha} U_R^2 [U_P / U_T - \theta_P] \quad (4.3.44)$$

Biết rằng: $U_R^2 = U_P^2 + U_T^2 \approx U_T^2$

ta lại có:

$$\tilde{L} = \frac{1}{2} \rho c C_{l\alpha} U_T^2 [U_P / U_T - \theta_P] = \frac{1}{2} \rho c C_{l\alpha} (U_P U_T - \theta_P U_T^2) \quad (4.3.45)$$

Công thức này đã được chứng minh,

Với cánh quạt di chuyển lên xuồng, vận tốc tiếp tuyến bằng vị trí bán kính nhân với tốc độ góc. Thông thường nó bị co hẹp bởi góc cosin di chuyển lên xuồng, nhưng do tiệm cận góc nhỏ vì vậy mà ta có thể bỏ qua được những ảnh hưởng của nó.

$$U_T = \Omega r \quad (4.3.46)$$

Thành phần vận tốc vuông góc thông thường là tốc độ gió chảy tự do nhỏ hơn tốc độ gió theo trục U_a . Vận tốc lên xuồng của gió r_β làm giảm tốc độ. Vì vậy mà:

$$U_P = U(1-a) - r \dot{\beta} \quad (4.3.47)$$

Các yếu tố biến đổi như là độ lệch lắc ngang, gió thổi theo hướng dọc, vận tốc thay đổi hướng gió đột ngột sẽ ảnh hưởng tới gió thổi quay cánh quạt. Những yếu tố này gồm có các nhiễu loạn trên dòng chính. Giả sử những nhiễu loạn là nhỏ so với vận tốc gió thổi theo hướng dọc. Chúng được gọi là “các tam giác” trong phân thảo luận dưới đây.

Độ lệch lắc ngang và gió cạnh: Một gió cạnh V_0 vuông góc với trục cua roto. Nó tăng lên do độ lệch lắc ngang (độ lệch của trục roto và gió) hay một sự thay đổi đột ngột của hướng gió. Nó giúp tăng vận tốc tiếp xúc trong cánh quạt hoạt động và giảm vận tốc tiếp xúc ở cánh quạt quét lùi. Như đã chỉ rõ ở

hình 4.17, gió cạnh được xác định là di chuyển từ trái qua phải. Khi cánh quạt quay theo chiều kim đồng hồ, gió cạnh làm giảm tốc độ tiếp xúc của gió khi cánh quạt nằm thấp hơn trực moay Ơ và làm tăng tốc độ tiếp xúc của gió khi nó nằm ở bên trên. Do đó, thay đổi thành phần tiếp xúc của gió nhờ gió cạnh $\Delta U_{T,crs}$ thì ta có:

$$\Delta U_{T,crs} = -V_0 \cos(\psi) \quad (4.3.48)$$

Khi cánh quạt không nằm trong mặt phẳng quay do góc dịch chuyển lên xuống β thì sẽ có một thành phần làm giảm tốc độ gió vuông góc ở cánh quạt $\Delta U_{P,crs}$ ta được:

$$\Delta U_{P,crs} = -V_0 \sin(\beta) \sin(\psi) \approx -V_0 \beta \sin(\psi) \quad (4.3.49)$$

Hãy lưu ý rằng: độ lệch chêch hướng không chế nhiễu loạn chu trình cosin ảnh hưởng tới vận tốc tiếp xúc.

Chuyển động lắc ngang: Chuyển động lắc ngang ảnh hưởng tới vận tốc của cánh quạt làm giảm momen hồi chuyển. Cần xem xét cánh quạt thẳng đứng và tỉ lệ lắc ngang của q. Cánh quạt sẽ hoạt động với một vận tốc nhờ quay lắc ngang của qd_{yaw} (và ở đây thì d_{yaw} là khoảng cách từ trực của cột tới phần trung tâm của roto). Nếu cánh quạt bị dốc (ngược gió) từ mặt phẳng quay bởi góc di chuyển lên xuống β . Thì nó sẽ làm tăng ảnh hưởng bởi yếu tố $qr \sin(\beta)$. Ảnh hưởng này là lớn nhất nếu cánh quạt lén hay xuống và không có ảnh hưởng nếu cánh quạt nằm theo chiều ngang.

Lấy tiệm cận xấp xỉ của góc nhỏ như trên và nhớ rằng $d_{yaw}\beta + r \approx r$ và $r\beta + d_{yaw} \approx d_{yaw}$

Delta tỷ lệ lắc ngang là

$$\Delta U_{T,yaw} = -qd_{yaw} \cos(\psi) \quad (4.3.50)$$

$$\Delta U_{P,yaw} = -qr \sin(\psi) \quad (4.3.51)$$

Lưu ý rằng các thuật ngữ lắc ngang cũng giống các thuật ngữ gió cạnh, thuật ngữ tiếp xúc thay đổi như cos và thuật ngữ đường thẳng đứng thay đổi như sin.

Vận tốc thay đổi hướng gió dọc: Trong chương hai của cuốn sách này, vận tốc thay đổi gió đột ngột theo chiều dọc được mô hình hóa với phương trình:

$$U_1 / U_2 = (h_1 / h_2)^\alpha \quad (4.3.52)$$

Ở đây thì α là số mũ của luật công suất và chỉ số dưới tương ứng với các chiều cao khác nhau:

Trong mô hình khí học đơn giản, giả sử rằng vận tốc thay đổi gió đột ngột theo chiều dọc là tuyến tính cắt ngang qua roto. Do đó, gió trong luồng tự do ở độ cao h được tính theo công thức:

$$U_h = U[1 - (r / R)K_{vs} \cos(\psi)] \quad (4.3.53)$$

Ở đây cho $h=0$ khi đầu mút lá cánh quạt giảm xuống, $h=2r$ khi đầu mút là cánh quạt đi lên và K_m là hằng số vận tốc tuyến tính thay đổi hướng gió đột ngột và chỉ số vs muôn nói tới lực cắt thẳng đứng.

Do đó, ở trung tâm của roto và theo hướng nằm ngang thì $U_n=U$. Ở định với độ lén xuống =0 thì $U_h=U(1+K_{vs})$ và ở đây là $U_h=U(1-K_{vs})$

Ảnh hưởng gia tăng của lực cắt thẳng đứng là phụ thuộc vào bộ phận thẳng đứng của gió, vì vậy ta giả sử delta vận tốc cắt gió độ ngọt tiếp xúc bằng không:

$$\Delta U_{T,vs} = 0 \quad (4.3.54)$$

Delta vận tốc cắt gió độ ngọt vuông góc tìm thấy ngay trong phương trình 4.3.53

$$\Delta U_{P,vs} = -U(r/R)K_{vs} \cos(\psi)] \quad (4.3.55)$$

Vận tốc cắt gió độ ngọt nằm ngang được xây dựng trên mô hình tương tự nhưng không được thảo luận ở đây.

Tóm lại thì với các góc xấp xỉ như các góc nhỏ, thì các phần được chỉ ra trong bảng 4.1:

Bảng 4.1: Các nhiễu loạn tốc độ của gió

	ΔU_P	ΔU_T
Dòng chảy hướng trực	$U(1-a) - r \dot{\beta}$	Ωr
Gió cạnh	$-V_0 \beta \sin(\psi)$	$-V_0 \cos(\psi)$
Tỷ lệ lắc ngang	$-qr \sin(\psi)$	$-qd_{yaw} \cos(\psi)$
Vận tốc cắt gió độ ngọt theo chiều dọc	$-U(r/R)K_{vs} \cos(\psi)$	0

Lưu ý rằng vận tốc cắt gió độ ngọt theo chiều dọc là một nhiễu loạn cosin. Gió cạnh cơ bản là bị nhiễu loạn cosin (yếu tố vận tốc tiếp diện). Tương tự, yếu tố theo chiều dọc của gió “upslope” là một nhiễu loạn hình sin.

Tìm ra tổng vận tốc trong các hướng vuông góc và tiếp diện bằng cách thêm tất cả các delta

$$U_P = U(1-a) - r \dot{\beta} - (V_0 \beta + qr) \sin(\psi) - U(r/R)K_{vs} \cos(\psi) \quad (4.3.56)$$

$$U_T = \Omega r - (V_0 + qd_{yaw}) \cos(\psi) \quad (4.3.57)$$

Các momen và lực khí động: Các thuật ngữ được phát triển ở trên để biểu đạt momen khí động trên cánh quạt. Nó được chỉ ra khi được thảo luận ở dưới đây, mômen cánh tà nhờ các lực khí động:

$$M_\beta = \frac{1}{2} \gamma I_b \Omega^2 \left\{ \frac{\Lambda}{3} - \frac{\beta'}{4} - \frac{\theta_p}{4} - \cos(\psi) \left[\bar{V} \left(\frac{\Lambda}{2} - \frac{\beta'}{3} - \frac{2\theta_p}{3} \right) + \frac{K_{vs} \bar{U}}{4} \right] - \sin(\psi) \left[\frac{\bar{V}_0 \beta}{3} + \frac{\bar{q}}{4} \right] \right\} \quad (4.3.58)$$

Ở đây thì:

Λ là dòng không thứ nguyên	$\Lambda = U(1-a) / \Omega R$
\overline{V}_0 là dòng cắt không thứ nguyên	$\overline{V}_0 = V_0 / \Omega R$
\overline{V} là toàn bộ dòng cắt không thứ nguyên	$\overline{V} = (V_0 + qd_{yaw}) / \Omega R$
β' là độ lệch thiên đỉnh của góc phẳng	$\dot{\beta}' = \dot{\beta} / \Omega$
γ là số khóa	$\gamma = \rho C_{L\alpha} c R^4 / I_b$
\overline{q} là tỷ lệ lắc ngang không thứ nguyên	$\overline{q} = q / \Omega$
\overline{U} là vận tốc gió không thứ nguyên	$\overline{U} = U / \Omega R = 1 / \lambda$

Phát triển phương trình mômen và lực khí động: các yếu tố của lực cánh quạt (lực tiếp diện và các phương pháp tuyến) được tính toán đã được thảo luận trong chương động lực học (chương 3) ngoại trừ (i): bao gồm góc cánh tà (góc phẳng) (ii) giả sử lực cản bằng không. Lực dọc trên chiều dài đơn vị \tilde{F}_N được tính toán theo công thức :

$$\tilde{F}_N = \tilde{L} \cos(\phi) \cos(\beta) \quad (4.3.59)$$

Lực tiếp diện trên chiều dài đơn vị \tilde{F}_T được tính toán theo công thức:

$$\tilde{F}_T = \tilde{L} \sin(\phi) \quad (4.3.60)$$

Các lực thay đổi cần phải được cộng lại trên cánh quạt để biết các lực cắt hay được nhân bằng các khoảng cách đầu tiên rồi cộng lại để cho các momen. Như đã đề cập ở trên, các cách đơn giản là cho $\sin(\phi) = U_p / U_T, \cos(\phi) = 1$ và $\cos(\beta) = 1$

Lực cắt phẳng ở đế cánh quạt là tích phân của lực dọc trên đơn vị chiều dài chia cho chiều dài của cánh quạt:

$$S_\beta = \int_0^R \tilde{F}_N dr = \int_0^R \tilde{L} \cos(\phi) \cos(\beta) dr \approx \int_0^1 \tilde{L} R d\eta \quad (4.3.61)$$

Ở đây cho $\eta = r / R$ Momen uốn phẳng ở đế quạt bằng tích phân của lực dọc trên một đơn vị chiều dài nhân với khoảng cách mà các lực hoạt đồng và chia cho chiều dài của cánh quạt

$$M_\beta = \int_0^R \tilde{F}_N r dr = \int_0^R \tilde{L} \cos(\phi) \cos(\beta) r dr \approx \int_0^1 \tilde{L} R^2 \eta d\eta \quad (4.3.62)$$

Phương trình momen phẳng có thể được phát triển thêm sử dụng phương trình 4.3.39 ta có:

$$M_\beta = \int_0^1 \tilde{L} R^2 \eta d\eta = \int_0^1 \left[\frac{1}{2} \rho c C_{L\alpha} (U_p U_T - \theta_p U_T^2) \right] R^2 \eta d\eta \quad (4.3.63)$$

Bằng cách tạo ra những thay đổi phù hợp và biểu diễn đại số có thể suy ra phương trình 4.3.58 ở trên:

Các phương trình đầy đủ của chuyển động: Phương trình chuyển động phẳng được lập ra bằng cách đưa ra các momen nhờ động khí học và tỉ lệ lắc ngang (hiệu ứng con quay) và biểu diễn các thao tác đại số thích hợp. Công thức là:

$$\beta'' + \left[1 + \varepsilon + \frac{G}{\Omega^2} \cos(\psi) + \frac{K_\beta}{\Omega^2 I_b} \right] \beta = \frac{M_\beta}{\Omega^2 I_b} - 2\bar{q} \cos(\psi) \quad (4.3.64)$$

Trong khi đó $\beta'' = \ddot{\beta}/\Omega^2$ là nguồn thứ hai trong phương vị của β và ở đây momen lực khí động M_β của phương trình 4.3.58. Lưu ý rằng các phương trình được biểu diễn về dẫn xuất phương vị sẽ được thảo luận chi tiết trong chương này. Nó giúp dễ dàng giải quyết các phương trình.

Mở rộng phương trình chuyển động phẳng. Trong phần này, phương trình chuyển động phẳng được biểu diễn ở bên trên trong phương trình 4.3.64 được mở rộng thêm.

Phương trình chuyển động tự do trong mặt phẳng bao gồm momen con quay và momen khí động :

$$\ddot{\beta} + \left[\Omega^2 (1 + \varepsilon) + G \cos(\psi) + \frac{K_\beta}{I_b} \right] \beta = \frac{M_\beta}{I_b} - 2\bar{q} \Omega \cos(\psi) \quad (4.3.65)$$

Chia cho Ω^2 ta có:

$$\frac{\ddot{\beta}}{\Omega^2} + \left[1 + \varepsilon + \frac{G}{\Omega^2} \cos(\psi) + \frac{K_\beta}{\Omega^2 I_b} \right] \beta = \frac{M_\beta}{\Omega^2 I_b} - 2\bar{q} \cos(\psi) \quad (4.3.66)$$

Phương trình mặt phẳng ở trên nằm trong miền thời gian. Giả sử tốc độ quay là không đổi, thì biểu diễn phương trình này như một vị trí góc phương vị.

Quy tắc dây chuyền được sử dụng như sau:

$$\dot{\beta} = \frac{d\beta}{dt} = \left(\frac{d\beta}{d\psi} \right) \left(\frac{d\psi}{dt} \right) = \Omega \left(\frac{d\beta}{d\psi} \right) = \Omega \beta' \quad (4.3.67)$$

Tương tự $\ddot{\beta} = \Omega^2 \beta''$

Lưu ý rằng điểm trên các biến có nghĩa là một dẫn xuất từ thời gian, trong đó thì dấu phẩy có nghĩa xuất phát tương ứng với phương vị.

Phương trình mặt phẳng được biểu diễn trong phương trình 4.3.64

Sắp xếp phương trình chuyển động trong mặt phẳng để giải quyết. Với sự thay đổi biểu thức hoàn toàn cho momen khí động và thuật ngữ thu thập ta có:

$$\begin{aligned} \beta'' + \left[\frac{\gamma}{8} \left(1 - \frac{4}{3} \bar{V} \cos(\psi) \right) \right] \beta' + \left[1 + \varepsilon + \frac{G}{\Omega^2} \cos(\psi) + \left(\frac{\gamma \bar{V}_0}{6} \right) \sin(\psi) + \frac{K_\beta}{\Omega^2 I_b} \right] \beta \\ = -2\bar{q} \cos(\psi) + \frac{\gamma}{2} \left(\frac{\Lambda}{3} - \frac{\theta_P}{4} \right) - \frac{\gamma}{8} \bar{q} \sin(\psi) - \cos(\psi) \left\{ \frac{\gamma}{2} \left[\bar{V} \left(\frac{\Lambda}{2} + \frac{2\theta_P}{3} \right) + \frac{K_{vs} \bar{U}}{4} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.3.68)$$

Phương trình chuyển động mặt phẳng có thể được biểu diễn dưới dạng đơn giản hơn để giải phương trình:

$$\begin{aligned} \beta'' + \left[\frac{\gamma}{8} \left(1 - \frac{4}{3} \cos(\psi) (\bar{V}_0 + \bar{q}\bar{d}) \right) \right] \beta' + \left[K + 2B\cos(\psi) + \left(\frac{\gamma}{6} \right) \bar{V}_0 \sin(\psi) \right] \beta \\ = \frac{\gamma A}{2} - \frac{\gamma \bar{q}}{8} \sin(\psi) - \left\{ 2\bar{q} + \frac{\gamma}{2} \left[A_3 (\bar{V}_0 + \bar{q}\bar{d}) + \frac{K_{vs}}{4} \bar{U} \right] \right\} \cos(\psi) \end{aligned} \quad (4.3.69)$$

ở đây thì

$$K = \text{tần số tự nhiên quán tính cánh tà (phẳng)} \quad (\text{bao gồm độ xoay, độ lệch, lò xo bắn lè})$$

$$K = 1 + \varepsilon + K_\beta / I_b \Omega^2$$

$$A = \text{dòng đồng trục} = (\Lambda / 3) - (\theta_p / 4)$$

$$As = \text{dòng đồng trục} = (\Lambda / 2) - (2\delta_p / 3)$$

$$B = \text{trọng lực} = G / 2\Omega^2$$

$$D = \text{cánh tay đòn lắc ngang} = d_{yaw} / R$$

Phương trình cuối cùng bao gồm các lực phục hồi và tất cả các momen lực ở trên và có thể được dùng để quyết định chạy roto dưới sự biến đổi của gió và các điều kiện nội động.

Bàn luận về phương trình mặt phẳng. Một khía cạnh quan trọng của động học tuabin gió cần rõ ràng trong các phương trình chuyển động mặt phẳng.

Phương trình cuối cùng bao gồm một thuật ngữ giảm rung. Tăng tốc β' phụ thuộc vào số khóa, số khóa bằng không khi không có khí động học. Điều này có nghĩa là cần có giảm rung trong mô hình này là do khí động học. Số khóa có thể coi như tỉ đối của lực khí động với các lực quán tính:

$$\gamma = \rho c C_{l\alpha} R^4 / I_b \quad (4.3.70)$$

Nếu độ dốc đường cong lực nâng bằng không hay bị tám thì số khóa cũng sẽ bằng không hoặc âm và không có bộ phận giảm sóc. Tồn tại một vấn đề trong roto cố định với bộ nối động học giữa lead-lag và các chuyển động biên. Trong trường hợp chuyển động phẳng tắt dần có thể gây rung biên.

Không có gió cạnh hay hệ số chống rung (trong phần 4.2)

$$\xi = \frac{\gamma}{16} \frac{1}{\omega_\beta / \Omega} \quad (4.3.71)$$

Trong đó thì ω_β là tần số va đập. Với các cánh quạt treo hay được nối bắn lè thì $\omega_\beta = \Omega$ vì vậy hệ số chống rung và đập xấp xỉ bằng $y/16$. Với các cánh quạt cố định ω_β giao thoa từ 2-3 lần cao hơn Ω , hệ số chống rung và đập có thể nhỏ hơn. Vì vậy các số khóa khoảng từ 5 đến 10, hệ số và đập giao thoa từ 0.5 đến 0.16. Số lượng chống rung đủ để chống rung từ va đập. Trong khi các chi tiết của các chuyển động lead-lag không được đề cập ở đây, nhưng cần lưu ý rằng việc phát triển phương trình chuyển động lead-lag có thể biểu diễn mà không có chống rung khí động. Thiếu chống rung trong lead-lag có thể dẫn đến tính không ổn định của cánh quạt.

Cần lưu ý rằng ở đây có một số hạng không đổi ở bên tay phải của phương trình chuyển động và đập ($y A/2$). Ở đây mô tả cánh quạt hình côn, có độ lệch không ffooir của cánh quạt nằm xa với mặt phẳng quay do lực ổn định của gió. Hình côn này sẽ được thêm vào bất kì một preconing nào. Preconing được gắn vào trong thiết kế roto vì một số lí do (i) nó giữ các đầu xa với cột (ii) nó giúp giảm momen uốn phẳng khi ngược gió, roto cố định và (iii) nó làm ổn định lắc ngang.

4.3.3.7 Các nghiệm của phương trình chuyển động và đập

Phương trình chuyển động và đập được biểu diễn theo hằng số, sin và cosi của góc phương vị. Nghiệm cực đại được biểu diễn như một dãy Fourier, phải nói rằng tổng sin và cosin của phương vụ với tần số cao hơn. Các tần số có thể bắt đầu với đường sin của phương vị và tăng bội số nguyên.

Giả sử các nghiệm này là tổng của hằng số, sin và cosin trong góc phương vị ta có kết quả tương đối đúng nhất. Sử dụng các giả thiết này, nghiệm của phương trình chuyển động và đập có thể được biểu diễn theo 3 hằng số $\beta_0, \beta_{lc}, \beta_{ls}$ và góc va đập sẽ là:

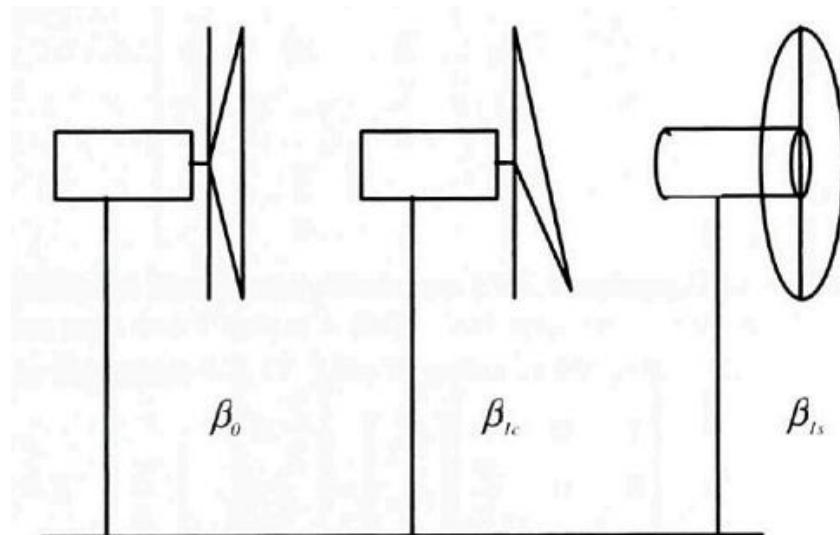
$$\beta \approx \beta_0 + \beta_{lc} \cos(\psi) + \beta_{ls} \sin(\psi) \quad (4.3.72)$$

Trong đó, β_0 là hằng số phản hồi không đổi chung hay góc nón, β_{lc} là hằng số phản hồi theo chu kỳ cosine và β_{ls} là hằng số phản hồi theo chu kỳ sinc.

Điều quan trọng cần lưu ý là những tác động có hướng trong các điều kiện khác nhau của phương trình. Hình 4.22 minh họa điều này. Điều kiện góc nón phải là dương. Điều này chỉ ra rằng cánh bẻ cong luồng gió đúng như dự tính. Từ hình 4.22, hằng số cosine dương cho thấy khi cánh dốc thẳng xuống, nó sẽ đẩy xuôi chiều gió. Khi cánh quay lên trên, nó có khuynh hướng ngược chiều gió. Ở vị trí ngang, cosine của góc phương vị bằng 0. Tuy nhiên, một mặt phẳng được xác định bởi đầu cánh sẽ nghiêng theo trục ngang, trên ngược chiều gió và dưới thuận chiều gió. Hằng số sinc dương nghĩa là cánh quay lên có xu hướng bị bẻ cong theo chiều gió khi quay ngang, và khi quay xuống cánh sẽ quay ngược chiều gió. Nói chung, trong hình, mặt phẳng được tạo bởi đầu cánh sẽ nghiêng sang trái (hướng lệch dương).

Tóm lại:

- Hằng số β cho biết cánh bẻ cong một góc theo chiều gió tương tự như khi nó quay tròn (như trong hình nón).
- Cosine β_{lc} cho ta biết mặt phẳng góc quay nghiêng theo chiều gió khi cánh đi lên và ngược chiều gió khi nó đi xuống.
- Sinc β_{ls} cho biết mặt phẳng góc quay nghiêng theo chiều gió khi cánh quay lên và ngược chiều gió khi quay xuống.



Hình 4.22: ảnh hưởng của các điều kiện khác nhau trong giải pháp; β_0 hệ số phản hồi chung; β_{lc} hệ số phản hồi theo chu kỳ cosine; β_{ls} hệ số phản hồi theo chu kỳ sinc (Eggleston and Stoddard, 1987) tái xuất bản dưới sự cho phép của nhà xuất bản Kluwer Academic/Plenum

Các hằng số trên đóng vai trò như là các hệ số khác nhau trong mô hình. Hình nón, liên quan chủ yếu tới luồng chảy hướng trực, trọng lượng cánh và hằng số đòn hồi. Cosine và Sinc phụ thuộc vào mức độ lệch, gió giật, và gió ngang (lỗi lệch) cũng như các điều kiện tương tự ảnh hưởng tới góc nón.

Áp dụng giả thiết rằng góc lệch của cánh có thể được chỉ ra trong phương trình 4.3.72, chúng ta có thể giải quyết công thức góc lệch dưới dạng đóng bằng cách lấy đạo hàm phương trình rồi lấy kết quả cho vào phương trình 4.3.73, tìm các điều kiện để đúng với hệ số của các hàm góc phương vị. Kết quả có thể được thể hiện trong phương trình ma trận sau:

$$\begin{bmatrix} K & B & -\frac{\gamma \bar{q}d}{12} \\ 2B & K-1 & \frac{\gamma}{8} \\ \frac{\gamma \bar{U}_0}{6} & -\frac{\gamma}{8} & K-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{lc} \\ \beta_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{2}A \\ -2\bar{q} - \frac{\gamma}{2}[(\bar{V}_0 + \bar{q}\bar{d})A_3] + \left(\frac{K_{vs}\bar{U}}{4}\right) \\ -\frac{\gamma}{8}\bar{q} \end{bmatrix} \quad (4.3.73)$$

Lời giải đơn giản cho phương trình góc lệch: Thông thường, giải pháp hữu ích cho phương trình chuyển động có thể được thấy qua việc áp dụng định lý Cramer cho phương trình 4.3.73. Tuy nhiên, giải pháp này sẽ được đề cập trong phần sau. Trong khi đó, điều đáng quan tâm hơn là xem xét các trường hợp đặc biệt và sự nhận biết về trường hợp cánh tương thích với các đầu vào cô lập. Người ta nhận thấy rằng, sự tương thích động lực học của tua-bin đối với đầu vào đơn giản sẽ khiến cánh chuyển động phức tạp thậm chí không xét đến các ảnh hưởng của chuyển động không đều và khí động lực phi tuyến.

Chỉ chuyển động tròn đều: Trước hết, ta phải xem xét trường hợp đơn giản nhất của chuyển động tròn đều khi:

Lực hấp dẫn = 0

Gió ngang = 0

Tỉ lệ lệch = 0

Di chuyển = 0

Lo xo khớp nối = 0

Chỉ các điều kiện không bằng 0 trong phương trình 4.3.73 là khí động học và lực ly tâm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{lc} \\ \beta_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{2}A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.74)$$

Đáp án hiển nhiên là:

$$\beta_0 = \frac{\gamma}{2}A \quad (4.3.75)$$

Tuy vậy, trường hợp này chỉ có góc nón, sự cân bằng giữa sức đẩy khí động học và lực ly tâm xác định góc lệch cánh. Không có sự phụ thuộc vào góc phương vị.

Chuyển động tròn đều + lò xo khớp nối + di chuyển: việc thêm các điều kiện lò xo, di chuyển sẽ tạo ra một dạng phương trình tương tự cho lời giải, tuy nhiên, góc lệch sẽ giảm. Phương trình lúc này là:

$$\begin{bmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & K-1 & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & K-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{lc} \\ \beta_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{2} A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.76)$$

Giờ kết quả là $\beta_0 = \frac{\gamma A}{2K}$. Lúc này, góc nón sinh ra từ sự cân bằng một bên là momen khí động lực học và một bên là lực ly tâm và momen lò xo khớp nối chống lại chúng. Đúng như những gì dự đoán, lò xo càng không biến dạng, góc nón càng nhỏ.

Chuyển động tròn đều + lò xo khớp nối + di chuyển + lực hấp dẫn: Lực hấp dẫn thêm vào càng làm vấn đề trở lên phức tạp. Như các trường hợp trước, giả sử rằng không có sự lệch, gió ngang và gió giật, phương trình ma trận trên sẽ thành:

$$\begin{bmatrix} K & B & 0 \\ 2B & K-1 & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & K-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{lc} \\ \beta_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{2} A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.77)$$

Để giải phương trình này, chúng ta cần áp dụng định lý Cramer. Để tiến hành, ta cần định thức D của ma trận trong phương trình 4.3.77. Định thức D sẽ là:

$$D = K \begin{vmatrix} K-1 & \frac{\gamma}{8} \\ -\frac{\gamma}{8} & K-1 \end{vmatrix} - B \begin{vmatrix} 2B & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & K-1 \end{vmatrix} = K \left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 \right] - 2B^2(K-1) \quad (4.3.78)$$

Theo định lý Cramer, khi tìm được những giá trị mong đợi bằng cách đặt véc-tơ phia tay phải vào cột tương ứng của ma trận, tìm ra định thức của ma trận mới và chia cho định thức của ma trận cũ.

Lần thứ nhất, kết quả là các sinc và cosine của góc phương vị. Lưu ý rằng, lực hấp dẫn phải được nhân với sinc và cosine.

$$\beta_0 = \frac{\gamma}{2} \frac{A}{D} \left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 \right] \quad (4.3.79)$$

$$\beta_{lc} = -B \frac{A}{D} \gamma (K-1) \quad (4.3.80)$$

$$\beta_{ls} = -B \frac{A}{D} \left(\frac{\gamma^2}{8} \right) \quad (4.3.81)$$

Bởi vì với điều kiện sinc và cosine âm, đĩa roto/ cánh quạt phải nghiêng sang trái, thuận chiều gió. Độ lớn của sinc và cosine có thể liên quan tới điều kiện “chia sẻ tuần hoàn”:

$$\beta_{ls} = \frac{\gamma}{8(K-1)} \beta_{lc} \quad (4.3.82)$$

Điều kiện chia sẻ tuần hoàn chỉ ra lượng mô-men liên quan lùi lại so với chuyển vị ngang. Đối với 1 roto với cánh bắn lè không lệ thuộc (K tiến gần 1), thì hầu hết chêch đường đều sẽ xảy ra. Đối với máy có gắn cánh cố định, tình trạng lđảo cánh vẫn xảy ra. Vấn đề này sẽ được xem xét trong phần độ dịch chuyển pha. Xin nói lại rằng, lực hấp dẫn là một đầu vào cosine đối với góc lệch. Với cánh cứng, cố định, tương thích hầu như là tương thích cosine. Do đó, sẽ có một vài sự dịch chuyển pha. Đối với một rôto treo, tương thích với đầu vào cosine chỉ là một chức năng của sinc trong góc phương vị. Điều đó có nghĩa là sự tương thích sẽ có độ lệch pha $\pi/2$ (90°) do dao động.

Gió giật + lò xo khớp nối: Trường hợp này không xét đến lực hấp dẫn, độ lệch và gió ngang, mà chỉ xét đến điều kiện gió giật. Phương trình cần giải có dạng:

$$\begin{bmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & K-1 & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & K-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{lc} \\ \beta_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{2} A \\ -\frac{\gamma}{8} K_{vs} \bar{U} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.83)$$

Định thức của ma trận hệ số được đơn giản hóa thành:

$$D = K \left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma^2}{8} \right) \right] \quad (4.3.84)$$

Lại áp dụng định lý Cramer, ta có:

$$\beta_0 = \frac{\gamma}{2} \frac{A}{D} \quad (4.3.85)$$

$$\beta_{lc} = -\frac{1}{D} \left[\frac{\gamma}{8} K_{vs} \bar{U} K (K-1) \right] \quad (4.3.86)$$

$$\beta_{ls} = -\frac{1}{D} \left[\frac{\gamma^2}{8} K_{vs} \bar{U} K \right] \quad (4.3.87)$$

Nhớ rằng gió giật là một đầu vào cosine, Tương tự như vậy, rôto cố định sẽ có cả cosine và sinc. Rôto treo với K=1 chỉ có sinc. Với các đầu vào khác, tua-bin như đã miêu tả ở trên có cả tương thích tuần tự cosine và sinc.

Lời giải khái quát phương trình góc lệch của chuyên động Lời giải cho chuyên động góc lệch cơ bản có thể được tìm thấy trong việc áp dụng định lý Cramer vào phương trình 4.3.73. Tuy nhiên, biểu thức đại số không thực sự là rõ ràng. Một hướng để giải thích biểu thức trong góc lệch giống như là tổng của các hằng số khác, cho thấy sự tác động của các lực khác nhau.

$$\beta_{1c} = \beta_{1c,ahg} + \beta_{1c,cr} + \beta_{1c,yr} + \beta_{1c,vs} \quad (4.3.88a)$$

$$\beta_{1s} = \beta_{1s,ahg} + \beta_{1s,cr} + \beta_{1s,yr} + \beta_{1s,vs} \quad (4.3.88b)$$

Trong đó, ahg là dòng trực ngang là dòng hướng trực, lò xo khớp nối, và lực hấp dẫn (trọng lực cánh), cr là cánh cạnh, vs là cắt gió theo chiều đứng, và yr là mức lệch.

Mỗi hằng số này có vai trò như là các thông số trong phương trình chuyển động. thay vì tiếp tục giải phương trình ma trận, dưới đây, xin được trình bày một vài điều kiện mà cách giải như thế này có thể có.

Điều kiện hình nón hằng số trôi gồm luồng chảy hướng trực, lò xo khớp nối, và lực hấp dẫn là:

$$\beta_0 = \frac{1}{D} \frac{\gamma A}{2} \left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8} \right)^2 \right] \quad (4.3.89)$$

Sin và cosine được tổng kết trong bảng 4.2

Bảng 4.2: Sự góp phần vào tương thích của cánh

*	Cosine, $\beta_{1c,*}$	Sine, $\beta_{1s,*}$
ahg	$-\frac{1}{D} \gamma B A (K-1)$	$-\frac{1}{D} \frac{\gamma}{8} B A$
cr	$\frac{\bar{V}_0}{D} \left[\left(\frac{\gamma}{8} \right)^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) \frac{4}{3} A - \frac{\gamma A_3}{2} K (K-1) \right]$	$-\frac{4 \bar{V}_0}{D} \left(\frac{\gamma}{8} \right)^2 \left[\frac{4}{3} A (K-1) + A_3 K \right]$
vs	$-\frac{K_{sh} \bar{U}}{D} \frac{\gamma}{8} K (K-1)$	$-\frac{K_{sh} \bar{U}}{D} \left(\frac{\gamma}{8} \right)^2 K$
yr	$\frac{K \bar{q}}{D} \left[\left(\frac{\gamma}{8} \right)^2 - 2(K-1) - \frac{\gamma A_3}{2} (K-1) \bar{d}_{yaw} \right]$	$-\frac{K \bar{q}}{D} \left(\frac{\gamma}{8} \right) \left[\frac{\gamma}{2} A_3 \bar{d}_{yaw} + K + 1 \right]$

Điều quan trọng đáng chú ý về các hằng số khác nhau là chúng có thể chỉ ra lượng tương thích theo đầu vào nhất định. Ví dụ, trong trường hợp cụ thể, nếu tương thích tuần hoàn sinc cắt gió có độ lớn bằng 0 so với toàn bộ hằng số tương thích tuần hoàn sinc, thì sau đó, nó sẽ lập tức hiển thị rằng các nhân tố khác ít quan trọng hơn.

4.3.3.8. Trọng tải trục bánh xe và cánh

Sự dịch chuyển lêch của cánh được xác định trong phương trình 4.3.73 có thể được sử dụng để xác định trọng tải chân quạt. Sau đó, mô-men và lực ở trục bánh xe và thân có thể xác định được từ lực cánh.

Với một tua-bin quay cứng (với cánh côngxon hoặc không bập bênh). Các mômen lead-lag và dãy động sẽ được truyền tới trục bánh xe. Dãy động chiếm ưu thế hơn và phần dưới đây sẽ tập chung vào tác động của các trọng tải này. Mặt khác, trong rô-to treo, không mô-men dãy động nào được truyền tới trục bánh xe (trừ khi các đầu dây treo bị chạm). Chỉ các lực trên mặt phẳng (theo hướng mô-men xoắn) được truyền tới trục bánh xe. Tuy nhiên, cuộc tranh cãi về rô-to treo không được đề cập trong bài viết này.

Hình 4.23 minh họa hệ tọa độ của các lực và mô-men được truyền tới trục bánh xe của một động cơ tiêu biểu.

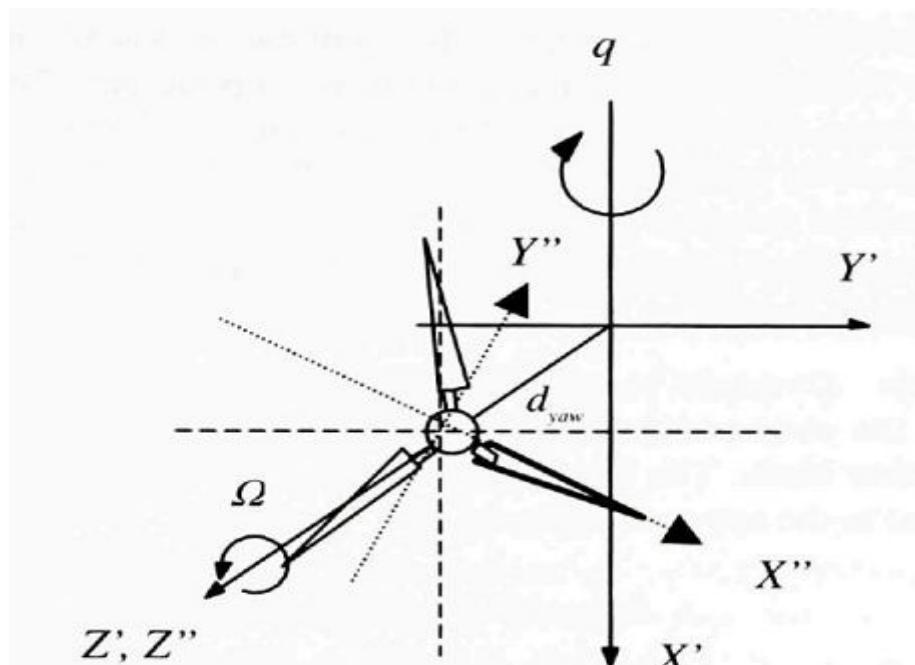
Nhắc lại rằng góc lệch cánh xấp xỉ bằng tổng:

$$\beta \approx \beta_0 + \beta_{1c} \cos(\psi) + \beta_{1s} \sin(\psi) \quad (4.3.90)$$

Mô-men bẻ gốc cánh tương ứng của từng cánh là:

$$M_\beta = K_\beta \beta \quad (4.3.91)$$

Trong một cách tương tự với việc khai triển phương trình góc lệch, ta có thể khai triển phương trình lead-lag và phương trình xoắn và sử dụng bộ tương thích đầy đủ để có trọng tải trục bánh xe. Những điều được tóm tắt trong phần 4.3.1.2 thì đầy đủ cho việc mở rộng mô hình như vậy.



Hình 4.23 Hệ tọa độ mô-men và lực trục bánh xe, d_{yaw} tay mô-men xoắn lệch, q . Độ lệch, Ω vận tốc góc.

Để tìm trọng lượng trục bánh từ nhiều cánh, thì lực và mô-men từ tất cả cách cần được xác định và tổng hợp tất cả các tác động. Lưu ý rằng sử dụng đúng góc phương vị trong từng trường hợp. Ví dụ, 1 rô-to với 3 cánh thì góc phương vị cho mỗi cánh là 120 độ. Nên lưu ý rằng với mô hình đơn giản hóa này, nếu các cánh được đặt đối xứng xung quanh rô-to thì tác động lên động cơ chuyển lực là chúng sẽ không đổi trong suốt quá trình quay. Bảng 4.3 tóm tắt các tác động chính của trục bánh đối với cả cánh treo và côngxon.

Bảng 4.3 Tương tác của bánh xe đối với cánh treo và cánh công xo

Tương tác của trục bánh xe	Rô-to treo	Công xo
----------------------------	------------	---------

Mô men cánh	Không	Đầy đủ
Bẻ cánh	Toàn bộ lực đẩy trên khớp	Lực đẩy lên từng khớp
Mô men lead-lag	Công suất mômen xoắn	Công suất mômen xoắn
Bẻ mô men lead-lag	Lực tạo xoắn	Lực tạo xoắn
Sức căng cánh	Lực ly tâm, trọng lượng	Lực ly tâm, trọng lượng
Vặn cánh	Mô men dọc	1 mô men dọc cánh

4.3.3.9 Trọng tải tháp

Trọng tải than được sinh ra từ trọng tải động lực học của tháp. Trọng tải của tua-bin và tháp và từ tất cả các lực khác trên máy, liệu rằng chúng ổn định, tuần hoàn hay có xung đột.

Trọng tải tháp ổn định: Trọng tải tháp ổn định bao gồm lực đẩy cánh quạt, mô-men từ động cơ dẫn động, trọng lượng tua-bin, và tải trọng bão. Tải trọng bão là các tải trọng động lực học được mong chờ từ các cơn gió mạnh nhất khi tua-bin không hoạt động. Thông tin chi tiết về trường hợp này được nêu trong chương 6.

Độ rung của tháp : Tần số rung tự nhiên của tháp (đối với tháp công xoay) được tính toán bằng các phương pháp miêu tả trong phần 4.2.2 gồm có trọng lượng định tĩnh. Các tháp được chằng dây không được đề cập đến trong bài này. Sự đánh giá quan trọng nhất trong thiết kế tháp là việc tránh các tần số tự nhiên gần với tần suất rỗ to (IP, IP hay 3/P). Tháp mềm là một trong số loại tháp có tần số tự nhiên cơ bản thấp hơn tần số của cánh. Tuy nhiên, tháp vững chắc có tần số tự nhiên trội hơn. Chương 6 sẽ cung cấp các thông tin chi tiết hơn về độ rung của tháp.

Trọng tải tháp động lực học: Trọng tải trên tháp là các phụ tải trên tháp xuất phát từ sự tương thích động lực của tua-bin gió. Với một động cơ vững chắc, mô-men cánh là nguồn chính của trọng tải tháp động lực học. Ba mô-men cho mỗi cánh (flapwise, lead-lag, và mô-men xoắn) được truyền tới tháp như sau:

$$M_{X'} = M_\beta \sin(\psi) \quad (4.3.92)$$

$$M_{Y'} = -M_\beta \cos(\psi) \quad (4.3.93)$$

$$M_{Z'} = M_\xi \quad (4.3.94)$$

Trong đó, X' là lệch, Y' là dọc, Z' là cản thân

Với nhiều cánh, sự đóng góp của mỗi cánh phải được tổng kết và điều chỉnh bởi góc phương vị tương ứng.

Đối với rỗ-to treo, mô-men góc lệch sẽ không được chuyển tới trực bánh xe (hoặc tháp) trừ khi các đầu treo bị chạm do vậy đóng góp ít vào trọng tải tháp động lực học dưới điều kiện hoạt động bình thường

4.3.3.10 Sự ổn định của độ lệch

Sự ổn định của độ lệch là một vấn đề của các tua-bin lệch tự do. Đây là một vấn đề phức tạp và ômбин động lực học đơn giản hóa là một tiện ích hạn chế trong việc phân tích vấn đề này. Tuy nhiên, nó lại cung cấp cái nhìn sâu hơn về một vài hiện tượng vật lý cơ bản. Điều quan trọng chính là các đầu vào khác nhau sẽ tạo ra sự tương thích tuần hoàn. Bất kỳ sự tương thích mạng sinc nào cũng dẫn đến mạng mô-men xoắn về trực lệch. (tuần hoàn Cosine sẽ đẩy tua-bin lên hoặc xuống trên ổ bi lệch tuy nhiên không phản ánh sự dịch chuyển lệch), ngược lại, nó đem lại độ ổn định cho động cơ dưới bất kỳ điều kiện nào. Tuần hoàn sinc bị tác động bởi sự hồi chuyển, lỗi lệch, cắt giò và lực hấp dẫn. Trở lại lời giải phương trình góc

lệch của chuyển động, nó chỉ rõ rằng tuần hoàn sinc được chia thành nhiều kỳ theo các tác động các nhau (phương trình 4.3.88b) sự đóng góp nổi bật trong hoạt động “tuần hoàn sinc” được đưa ra trong bảng 4.2.

Điều đầu tiên cần chú ý là việc cắt gió đứng và lực hấp dẫn trên cánh bể có khuynh hướng đẩy động cơ ra ngoài gió cùng hướng (đối với hướng lâm hình 4.23). Điều này có nghĩa là rô-to có hướng chịu gió ngang từ hướng âm. Do lỗi lệch, gió ngang sẽ đưa rô-to quay trở lại theo hướng khác. Đối với sự ổn định của góc lệch, nếu lự hấp dẫn, gió đứng và cắt gió chỉ là các tác động cần xét đến thì sẽ có một góc lệch như sau:

$$\beta_{1s,cr} = \beta_{1s,ahg} + \beta_{1s,vs} \quad (4.3.95)$$

Áp dụng phương trình này, nhưng không loại bỏ cắt gió và giả định một góc nhỏ gần đúng. Ta có thể thấy rằng lỗi lệch ở trạng thái ổn định 6 sẽ xấp xỉ:

$$\Theta = \frac{\Omega R}{V} \left(\frac{3B}{2(2K-1)} \right) \quad (4.3.96)$$

Sau đó, lỗi lệch ở trạng thái ổn định trong việc không xét đến cắt gió đứng sẽ lớn hơn với tốc độ rô-to nhanh hơn và nhẹ hơn (K nhỏ hơn). Cắt gió chiều đứng có thể tăng lỗi lệch. Cuối cùng là, một phân tích các điều kiện khác nhau trong lời giải chỉ ra rằng rô-to có preconing ổn định hơn các rô-to không có.

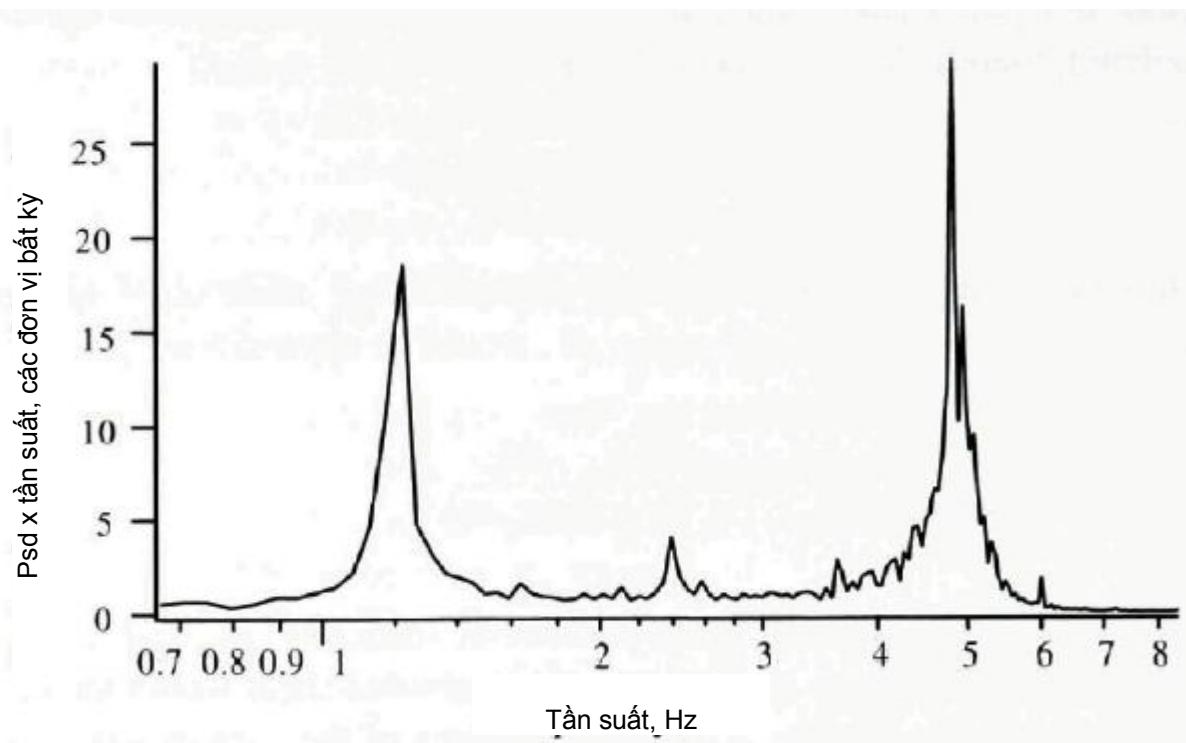
Mô hình động lực học lò xo khớp nối tuyến tính đưa ra cái nhìn sâu sắc về sự ổn định của góc lệch, tuy vậy, đối tượng phức tạp hơn mô hình đòi hỏi nhất đưa ra. Thay đổi góc tác động, hỗn loạn, và tác động khí động học không ổn định... Tất cả đều ảnh hưởng tới cự ổn định góc lệch của tua-bin thực. Phân tích bổ sung về khả năng mô hình động năng giản đơn tương ứng nhằm đưa ra cái nhìn cụ thể hơn về tính ổn định của độ lệch có thể được đưa ra ở Eggleston and Stoddard (1987). Tuy nhiên, cuộc thử nghiệm đã chỉ ra rằng, cụ thể là trong vấn đề chuyển động lệch, cần thêm phương pháp phân tích toàn diện. một giải pháp được tích hợp trong mô hình máy tính YawDyn sẽ được đề cập sau trong chương này.

4.3.3.11 Khả năng ứng dụng và hạn chế của mô hình động lực lò xo khớp nối tuyến tính

Mô hình động lực tuyến tính nói ở trên có thể rất hữu ích trong việc đem lại cái nhìn sâu về động lực tuabin gió. Tuy nhiên, có vài khía cạnh hoạt động quan trọng của rô-to không xuất hiện trong mô hình. Dữ liệu thực thường đưa ra các dao động không đoán trước được. Quay trở lại hình 4.10, chúng ta nhớ lại rằng mô-men bẻ cong gốc cánh được miêu tả ở đây chỉ cho ta thấy dao động tần số cao hơn. Ý nghĩa quan trọng của điều này được minh họa chi tiết trong năng lượng phô quang, một dạng mật độ năng lượng phô quang (psd).

Psd được nói ở chương 2 liên quan tới biến đổi tốc độ gió hỗn loạn. Nó có thể được dung để minh họa lương năng lượng tương đối trong các loại hình biến đổi khác như chức năng tần số, trên trực log ghi psd nhận tần số với tần số, phần dưới đường nằm tỉ lệ thuận với phương sai gắn với tần số tương ứng. Trong dạng này, psd được gọi là phô quang năng lượng.

Hình 4.24 cho thấy phô quang năng lượng (với các đơn vị tùy chọn) bao gồm dữ liệu được sử dụng trong hình 4.10, trong các dữ liệu đo được, đúng như mong đợi, IP đã tăng vọt (72 rpm hay 1.2 Hz). Thêm vào đó, mức tăng đạt xấp xỉ 2P và 4P. Các loại tăng đột ngột khác là do các hỗn loạn trong gió và vài tần số tự nhiên của cánh. Điều quan trọng đáng chú ý là mô hình lò xo khớp nối có khả năng tái sản sinh thích ứng IP. Không bất cứ tần số nào có thể dự đoán trước được. Và từ hình ta có thể thấy có một lượng năng lượng đáng kể gắn liền với các tần số cao đó.



Hình 4.24: Độ phổ của mô men vặn góc cánh, psd , công suất phổ điện

4.4 Mô hình động năng chi tiết và chuyên dụng

Mô hình lò xo khớp nối tuyến tính được đề cập ở mục 4.3 có nhiều lợi thế chứng minh động cơ tuabin gió đã đáp ứng được yêu cầu thứ nhất trong một loạt điều kiện đầu vào. Tuy nhiên, nó lại không hữu ích trong một vài trường hợp mà không đáp ứng được các yêu cầu quan trọng. Để khắc phục hạn chế này, ta cần phát triển mô hình chi tiết và chuyên dụng hơn. Cụ thể là, các mô hình này yêu cầu một số các giải pháp và lắp đặt mã máy tính. Mô hình phi tuyến tính chuyên dụng có thể được sử dụng để khám phá động lực của hệ thống con tuabin như đầu cánh, cánh, mối liên kết, bánh răng... Không có một mô hình đơn lẻ nào có khả năng đối giải quyết được tất cả các tình huống này, tuy nhiên sự hiểu biết hướng tiếp cận mô hình chi tiết là công cụ cho việc phân tích cụ thể hơn. Phần này sẽ đề cập tới một vài mô hình nhưng tập chung chính vào mô hình YawDyn (mô hình được nhắc đến đầu tiên trong chương 3).

4.4.1 YawDyn

YawDyn là mã phân tích động học và khí động học hoàn chỉnh cho tuabin gió trực ngang tốc độ không đổi (Hansen, 1992; 1996). Mục đích của mô hình là giúp con người hiểu vấn đề mà trong đó tuabin gió trực ngang của những năm 1980 đã gặp phải do chuyển động lệch hướng. Mô hình này thực sự đem đến sự hiểu biết hữu ích về các vấn đề lệch góc. Nó cũng đem lại sự hiểu biết cho các câu trả lời khác.

Nguyên lý của mô hình YawDyn gần giống với nguyên lý của động cơ lò xo khớp nối tuyến tính. Tuy nhiên có một vài điểm khác liên quan đến mô hình khí động học và có xét đến các giải pháp.

4.4.1.1 Mô hình tuabin YawDyn

Mô hình cơ học của tuabin cơ bản giống với mô hình lò xo khớp nối tuyến tính. Các cánh được coi là các thanh cứng được nối với trực bánh xe bởi khớp nối và lò xo.Thêm vào đó, chuyển động lệch hướng không cố định của toàn bộ tuabin về phía trực lệch thì được phép, và cũng phải xét độ cứng dải bánh lái lệch. Một điểm khác nữa là tuabin có thể được thiết kế với rô-to treo.

4.4.1.2 Mô hình khí động lực học YawDyn

Sự khác biệt lớn nhất giữa mô hình lò xo tuyến tính và mô hình YawDyn nằm ở khí động học. Mô hình lò xo khớp nối tuyến tính sử dụng mô hình khí động lực học đơn giản hóa. Ta thấy rằng sự di chuyển góc lệch bị tác động bởi sự khác biệt nhỏ về trọng lượng chuyển từ cánh này sang cánh tiếp. Và sự khác biệt này không xuất hiện ở mô hình đơn giản hóa. Do vậy, mô hình khí động học cần phải tăng chính xác hơn nữa.Thêm vào đó, cần xét đến sự thay đổi của gió (như cắt gió chiều ngang hay dọc).

Mô hình khí động học của YawDyn bao gồm các tính năng sau, hầu hết chúng không có trong mô hình đơn giản hóa:

- Yếu tố cánh/ thuyết động lực
- Thức sai lệch
- Hiện tượng đứt dòng động năng
- Bóng tháp
- Cắt gió theo chiều dọc
- Cắt gió theo chiều ngang
- Gió dọc
- Dòng không ổn định (dòng hỗn loạn)

Từng tính năng đã được nói trong chương 3. Ta cũng cần lưu ý rằng phần khí động học của mô hình YawDyn đã chỉ ra rằng nó được tách rời như mã độc lập. AeroDyn- tên mô hình khí động học của YawDyn đã được dùng để cung cấp đầu vào cho các mô hình khí động học chi tiết hơn như ADAMSAVT (xem thêm phần 4.4.2.2).

4.4.1.3 Giải pháp

Mô hình lò xo khô nối tuyến tính thì đơn giản mà hiệu quả, phương trình có thể được triển khai và giải dưới dạng toán thông thường mặc dù nó là cả một quá trình rườm rà và phức tạp. Phương trình được sử dụng trong mô hình YawDyn khó có thể giải bằng tay, do vậy mã thao tác thuật toán máy tính Mathemafica™ (Wolfram, 1991) được dùng. Mô hình tuyến tính được giả với một giả thiết hình sinc. Điều này đem lại kết quả dạng đóng thuận tiện. Trong mô hình YawDyn, người ta giả thiết rằng mô men cánh và mô men góc lệch có thể được diễn tả như là các dãy Fourier, do vậy mà các giải pháp bao gồm nhiều giai đoạn. Kể từ khi giả thiết điều kiện đầu vào thay đổi, thì giải pháp dạng đóng không còn là một câu hỏi. Do vậy, phương pháp giải phương trình là giải pháp đột phá trong nhân loại.

4.4.2 Các mã khí động lực khác

Có rất nhiều code máy tính khác nhau có thể sử dụng để phân tích khí động lực rotors. Phòng thí nghiệm năng lượng tái sinh quốc gia(NREL) tại Boulder, Colorado, đã phát triển rất nhiều code như vậy, và đã đưa một vài trong số đó lên Internet. Mô tả sơ lược về 2 trong số các code đó sẽ được trình bày dưới đây. Chi tiết hơn về việc sử dụng những mã này và ưu, nhược điểm của chúng được đăng tải trên website của phòng thí nghiệm (<http://www.nrel.gov>). Bên cạnh những code của NREL, trên thị trường hiện nay cũng có rất nhiều code khác xây dựng khí động học tuabin gió. Hai code được đề cập đến ở đây là FAST_AD và ADAMS/WT.

4.4.2.1 FAST_AD

FAST_AD là loại code có độ phức tạp trung bình để phân tích khí động lực và động lực của tuabin gió trực nằm ngang với 2 hoặc 3 cánh quạt và 1 ván bập bênh hoặc bánh xe cố định. FAST_AD phôi hợp chặt chẽ các đoạn chương trình điều khiển luồng gió hỗn loạn đi vào rotor với các đoạn chương trình xác định khí động lực tải. Phân tích động lực cho phép 14 mức tự do bao gồm chế độ đa trực bắt buộc, chế độ ba cánh quạt bắt buộc, chế độ truyền động trênh hướng, bập bênh. Code này nhằm cho phép nhiều chế độ tự do hơn tuabin YawDyn, nhưng cho ra kết quả nhanh hơn ADAMS/WT.

4.4.2.2 ADAMSAVT

ADAMS/WT (Anon., 1998) là code động lực chi tiết có thể nhận là đầu vào của chương trình con AeroDyn đã đề cập đến trong phần 4.4.1.2. Để phân tích chi tiết các cấu trúc phức tạp hơn thì cần có lực đầu vào thích hợp. Vì thế, khả năng ADAMS/WT dùng các kiểu khí động lực sẵn có làm lực đầu vào khiến cho nó trở thành một công cụ mạnh mẽ. ADAMS/WT có thể phân tích động lực của trực, vỏ động cơ máy bay, bộ truyền động, trực bánh xe, cánh quạt. Mức độ chi tiết đối với mỗi hệ thống con đó là tùy

thuộc vào người dùng. Ví dụ, các cánh quạt và trục có thể được xem là trục đồng nhất hoặc một khối tập trung với sự nối tiếp các mômen khác nhau có quán tính, độ vững khác nhau.

Tài liệu tham khảo

- Anon. (1998) *ADAMS/WT 2.0 User's Guide*, Mechanical Dynamics, Inc., Mesa, AZ.
- Ansell. M. P. (1987) Layman's Guide to Fatigue: The Geoff Pontin Memorial Lecture. *Proceedings of the 9th British Wind Energy Association Annual Conference*. Mechanical Engineering Publications.
- Beer F. P.. Johnston E. R., Jr. (1976) *Mechanics for Engineers*, 3rd Edition. McGraw Hill Book Co., New York, 1976.
- Den Hartog, J. P. (1961) *Mechanics*, Dover Publications, New York.
- Downing, S. D.. Socie, D. F. (1982) Simple Rainflow Counting Algorithms, *International Journal of Fatigue*, January 1982, p. 31.
- Eggleston, D. M.. Stoddard. F. S. (1987) *Wind Turbine Engineering Design*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Garrad, A. D.. Hassan, U. (1986) The Dynamic Response of a Wind Turbine for Fatigue Life and Extreme Load Prediction. *Proceedings of the European Wind Energy Assoc. Conference (EWEC'86)*, A. Ragguzi, Bookshop for Scientific Publications, Rome.
- Hansen, A. C. (1992) *Yaw Dynamics of Horizontal Axis Wind Turbines: Final Report*, National Renewable Energy Laboratory, NREL Technical Report TP 442-4822
- Hansen, A. C. (1996) *User's Guide to the Wind Turbine Dynamics Computer Programs YawDyn and AeroDyn for ADAMS®, Version 9.6*. Univ. of Utah, Salt Lake City. Prepared for the National Renewable Energy Laboratory under Subcontract No. XAF-4-14076-02.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., Abdulwahid, U., Rogers, A., McNiff, B. P. (1996) A Graphical Interface Based Model for Wind Turbine Dynamics. *Proceedings of the AWEA Annual Conference*, Denver, CO.
- Merriam, J. L. (1978) *Engineering Mechanics: Vol. 1, Statics. Engineering Mechanics: Vol. 2, Dynamics*. John Wiley, New York, 1978.
- Pytel, A., Singer, F. L. (1987) *Strength of Materials*, 4th Edition. Harper and Row. New York.
- Shigley, R. G., Mischke, C. R. (1989) *Mechanical Engineering Design*, 5th. Edition. McGraw Hill, New York.
- Spotts. M. E. (1985) *Design of Machine Elements*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Sutherland, H. J., Veers, P. S., Ashwill. T. D. (1995) *Fatigue Life Prediction for Wind Turbines: A Case Study on Loading Spectra and Parameter Sensitivity*. Standard Technical Publication 1250, American Society for Testing and Materials, 1916 Race St.. Philadelphia, PA.
- Thomson, W. T. (1981) *Theory of Vibrations with Applications*, 2nd Edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Wolfram, S. (1991) *Mathematica: a System for Doing Mathematics by Computer*. Addison-Wesley, Redwood City, CA.

Chương 5 Điện trong các loại tuabin gió

5.1 Tổng quan

Điện liên quan đến rất nhiều khía cạnh của những loại tuabin gió hiện đại. Rõ ràng nhất là chức năng chính của tuabin gió là sản xuất ra dòng điện. Vì vậy, rất nhiều chủ đề về kỹ thuật xây dựng hệ thống năng lượng có liên quan trực tiếp đến những vấn đề của tuabin gió: sản xuất điện ở tuabin cũng như là truyền tải điện với hiệu điện thế sinh ra, chuyển đổi thành hiệu điện thế cao hơn, nối liền với đường dây điện, phân phối, truyền tải và cuối cùng được khách hàng sử dụng. Điện được dùng trong tổ chức, quản lý, điều khiển phần lớn các bộ phận của tuabin gió; và trong đánh giá vị trí, thu thập và phân tích dữ liệu. Đôi với những mạng lưới điện riêng biệt hoặc nhỏ, hoặc hệ thống có lượng gió thu được lớn thì tích trữ điện là một vấn đề. Cuối cùng, xét là hiện tượng tự nhiên thường xảy ra sẽ đòi hỏi những thiết kế, lắp đặt đặc biệt dành cho hệ thống tuabin gió.

Những bộ phận chủ yếu trong đó điện có ý nghĩa quan trọng trong thiết kế, lắp đặt và hoạt động được liệt kê trong bảng 5.1.

Trong chương này bao gồm 2 phần chính: phần đầu tiên, khái quát về những nguyên tắc cơ bản nhất; phần thứ hai, mô tả những vấn đề liên quan đến tuabin, đặc biệt là về máy phát điện và máy chuyển đổi năng lượng. Mọi liên quan giữa máy phát điện với mạng lưới điện và các vấn đề liên quan đến toàn bộ hệ thống sẽ được đề cập trong chương 8.

Khái quát về những nguyên tắc cơ bản tập trung chủ yếu vào dòng điện xoay chiều. Vấn đề dòng điện xoay chiều bao gồm biểu diễn pha, năng lượng thực tế và năng lượng phản ứng, điện ba pha, những nguyên tắc cơ bản về điện từ và máy biến thế. Những vấn đề liên quan đến tuabin gió bao gồm: một số loại máy phát điện phổ biến, chạy máy phát điện, đồng bộ chuyển đổi năng lượng, và các thiết bị chạy bằng điện.

5.2. Những khái niệm cơ bản về năng lượng điện

5.2.1. Những nguyên tắc cơ bản về điện

Trong chương này, ta thừa nhận rằng người đọc đã hiểu những nguyên lý cơ bản nhất về điện, bao gồm về mạch điện một chiều, vì thế những mục đó sẽ không được đề cập chi tiết. Bạn đọc có thể tìm đọc thêm ở những tài liệu khác, như của Edminster (1965), để tham khảo thêm thông tin chi tiết. Những vấn đề ta thừa nhận rằng người đọc đã hiểu rõ bao gồm:

- Hiệu điện thế
- Dòng điện
- Điện trở
- Suất điện trở
- Dây dẫn
- Chất cách điện
- Mạch điện một chiều
- Định luật Ohm
- Năng lượng điện
- Định luật Kirchhoff về mạch và nút mạch
- Tụ điện
- Cuộn cảm
- Thời gian cố định của mạch RC và RL

- Cụm điện trở mắc nối tiếp/ song song

Bảng 5.1: Ví dụ về các bộ phận chủ yếu dùng điện trong tuabin gió

Phát điện	Máy phát điện Máy chuyển đổi điện năng	Lưu trữ	Pin Máy chỉnh lưu Máy đổi điện
Kết nối và phân phối	Dây điện Hộp số chuyển đổi Công tắc Máy biến thế Máy đo chất lượng điện	Chống sét	Nền Cột chống sét Vùng an toàn
Điều khiển	Cảm biến Bảng điều khiển Mô tơ chuyển động Óng dây	Tải cuối	Thắp sáng Sưởi Chạy mô tơ
Giám sát	Đo đặc và lưu trữ dữ liệu Phân tích dữ liệu		

5.2.2. Dòng điện xoay chiều

Dòng điện sử dụng phổ biến trong hệ thống điện là dòng xoay chiều. Trong mục này, ta thừa nhận rằng người đọc có hiểu một chút về dòng xoay chiều, vì thế chỉ đề cập đến những đặc điểm chính. Trong dòng xoay chiều (trạng thái ổn định), tất cả hiệu điện thế và dòng điện thay đổi theo dạng hình sin. Mỗi chu kỳ là một hình sin đầy đủ. Tại Mỹ và nhiều nước phía tây bán cầu, tần số dòng xoay chiều chuẩn là 60 chu kỳ/ giây (gọi là Hertz, viết tắt là Hz). Ở hầu hết các quốc gia còn lại, tần số chuẩn là 50Hz.

Hiệu điện thế tức thời, v , trong mạch AC có thể được biểu diễn bằng phương trình sau:

$$v = V_{max} \sin(2\pi ft + \phi) \quad (5.2.1)$$

Với V_{max} là giá trị hiệu điện thế lớn nhất, t là thời gian và ϕ là góc pha.

Góc pha biểu diễn góc dịch chuyển của đồ thị sin từ một sóng sin quy chiếu với góc bằng 0. Góc pha là đại lượng quan trọng vì dòng điện và hiệu điện thế mặc dù đều là hình sin nhưng không nhất thiết phải cùng pha với nhau. Khi phân tích mạch xoay chiều, ta thường thừa nhận rằng một hình sin có pha bằng 0, và tìm góc pha của các hình sin khác tương ứng với quy chiếu đó.

Một cách đo hiệu điện thế đơn giản rất quan trọng là dựa vào giá trị hiệu dụng của V_{max} :

$$V_{rms} = \sqrt{\int_{cycle} v^2 dt} = V_{max} \sqrt{\int_{cycle} \sin^2(2\pi ft) dt} = V_{max} \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (5.2.2)$$

Chú ý rằng giá trị hiệu dụng của hiệu điện thế là $\frac{\sqrt{2}}{2}$, hoặc bằng khoảng 70% giá trị tối đa của hiệu điện thế trong hình sin đơn giản. Giá trị hiệu điện thế hiệu dụng thường được coi là độ lớn của hiệu điện thế, vì thế $|V| = V_{max}$.

5.2.2.1. Tụ điện của mạch xoay chiều

Dòng điện trong tụ điện tỷ lệ với dẫn xuất của hiệu điện thế, vì vậy, nếu hiệu điện thế qua tụ điện là $v = V_{max} \sin(2\pi ft)$ thì dòng điện tức thời, i , là:

$$i = C \frac{dv}{dt} = 2\pi f V_{max} C \sin(2\pi ft + \pi / 2) \quad (5.2.3)$$

với C là điện dung. Phương trình 5.2.3 có thể được viết lại thành:

$$i = I_{max} \sin(2\pi ft + \pi / 2) \quad (5.2.4)$$

với $I_{max} = V_{max} / X_c$ và $X_c = 1/(2\pi f)$. Trong đó X_c là dung kháng, tương tự như điện trở kháng trong mạch một chiều. Chú ý rằng khi dòng điện thay đổi đúng lúc, đường hình sin sẽ bị thay đổi $\pi / 2$ radian phía trên đường hình sin của hiệu điện thế. Do đó ta nói dòng điện trong tụ điện nhanh hơn hiệu điện thế.

5.2.2.2 Cuộn cảm trong dòng xoay chiều

Dòng điện trong cuộn cảm tỷ lệ với tích phân của hiệu điện thế. Mối quan hệ giữa dòng điện và hiệu điện thế trong một cuộn cảm có thể được thấy trong phương trình sau:

$$i = \frac{1}{L} \int v dt = \frac{V_{max}}{2\pi f L} \sin(2\pi ft - \pi / 2) \quad (5.2.5)$$

với L là độ tự cảm. Tương tự như phương trình của tụ điện, phương trình 5.2.5 có thể được viết lại thành: X_L

$$i = \frac{V_{max}}{X_L} \sin(2\pi ft - \pi / 2) \quad (5.2.6)$$

với X_L là cảm kháng ($X_L = 2\pi f$). Chú ý rằng trong cuộn cảm, dòng điện chậm hơn hiệu điện thế.

5.2.2.3 Biểu diễn pha

Các hàm sin, cos biểu diễn những mối liên hệ khác nhau có thể rất phức tạp. Rất may, quá trình có thể đơn giản hơn rất nhiều khi tần số cố định. Đó là trường hợp thường gặp trong hầu hết hệ thống điện xoay chiều. (chú ý rằng với trạng thái nhất thời thì cần phân tích theo phương pháp phức tạp hơn rất nhiều.) Các bước biểu diễn pha sẽ được trình bày dưới đây.

Việc sử dụng pha đòi hỏi phải biểu diễn hình sin bằng các số phức. Ví dụ, hiệu điện thế trong phương trình 5.2.1 có thể được biểu diễn dưới dạng pha như sau:

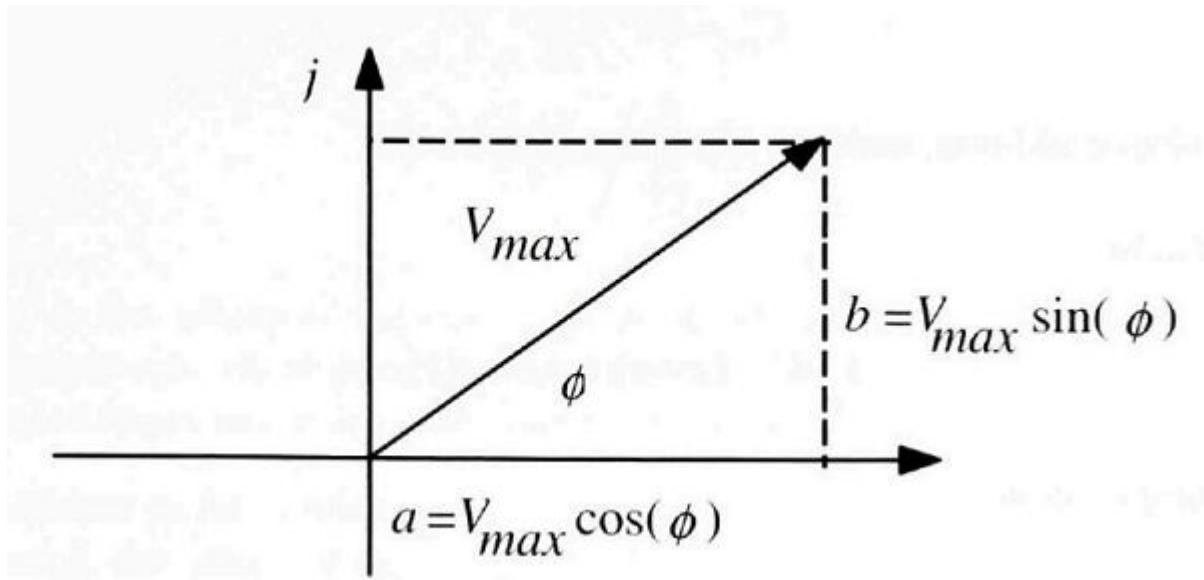
$$\hat{V} = V_{max} e^{j\phi} = a + jb = V_{max} \angle \phi \quad (5.2.7)$$

Kiểu chữ đậm và dấu mũ được sử dụng để ký hiệu một pha. Ở đây, $j = \sqrt{-1}$, \angle biểu diễn góc giữa pha và trục thật, ϕ là góc pha và:

$$a = V_{max} \cos(\phi) \quad (5.2.8)$$

$$b = V_{max} \sin(\phi) \quad (5.2.9)$$

Hình 5.1 biểu diễn một pha. Chú ý rằng nó có thể biểu diễn tương đương bằng tọa độ vuông góc hoặc tọa độ có cực.



Hình 5.1: Pha

Theo cách biểu diễn này, tần số bị ẩn đi. Để thể hiện thời gian của chuỗi hình sin, bạn có thể sử dụng phương trình sau:

$$V(t) = \operatorname{Re} \left\{ V_{max} e^{j\phi} e^{j2\pi ft} \right\} \quad (5.2.10)$$

Với $\operatorname{Re}\{\}$ là phần thực được sử dụng, và $e^{j\phi} = \cos(\phi) + j \sin(\phi)$

Cũng tương tự như vậy, dòng điện cũng có thể được biểu diễn bằng pha, \hat{I} , được biểu diễn qua I_{max} và pha của dòng điện.

Một vài quy tắc có thể áp dụng khi biểu diễn pha sẽ được trình bày dưới đây. Chú ý rằng sử dụng tọa độ vuông góc đôi khi thuận lợi hơn sử dụng tọa độ có cực. Ta sẽ bắt đầu bằng biểu diễn pha \hat{A} và \hat{C}

$$\hat{A} = a + jb = A_m e^{j\phi_a} = A_m \angle \phi_a \quad (5.2.11)$$

$$\hat{C} = c + jd = C_m e^{j\phi_c} = C_m \angle \phi_c \quad (5.2.12)$$

Với

$$\phi_a = \tan^{-1}(b/a) \quad (5.2.13)$$

$$\phi_c = \tan^{-1}(d/c) \quad (5.2.14)$$

$$A_m = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5.2.15)$$

$$C_m = \sqrt{c^2 + d^2} \quad (5.2.16)$$

Quy tắc cộng, nhân và chia pha như sau:

Cộng pha:

$$\hat{A} + \hat{C} = (a + c) + j(b + d) \quad (5.2.17)$$

Nhân pha:

$$\hat{A} \hat{C} = A_m \angle \phi_a C_m \angle \phi_c = A_m C_m \angle (\phi_a + \phi_c) \quad (5.2.18)$$

Chia pha:

$$\frac{\hat{A}}{\hat{C}} = \frac{A_m \angle \phi_a}{C_m \angle \phi_c} = \frac{A_m}{C_m} \angle (\phi_a - \phi_c) \quad (5.2.19)$$

Chi tiết hơn về pha có thể tìm đọc trong các bài viết về dòng AC, trong đó có cuốn của Brown and Hamilton (1984).

5.2.2.4 Trở kháng phức tạp

Đương lượng điện trở trong mạch xoay chiều là trở kháng phức tạp, \hat{Z} , bao gồm cả điện trở và điện kháng. Trở kháng có thể được dùng trong pha hiệu điện thế để xác định pha dòng điệnj và ngược lại. Trở kháng bao gồm phần thực (điện trở) và phần ảo (cảm điện hay dung kháng). Điện trở kháng được tính bằng $\hat{Z}_R = R$, với R là điện trở. Cảm điện và dung kháng được tính bằng $\hat{Z}_L = j2\pi f L$ và $\hat{Z}_C = -j2\pi f C$, với f là tần số xoay chiều đo bằng Hz. Chú ý rằng đối với mạch điện trở, trở kháng bằng điện trở, đối với mạch tụ điện, trở kháng bằng điện kháng. Cảm điện và cảm kháng là một hàm của hiệu điện thế biến thiên trong mạch xoay chiều.

Công thức liên hệ hiệu điện thế, dòng điện và trở kháng trong mạch AC cũng tương tự như trong mạch DC.

Định luật Ohm:

$$\hat{V} = \hat{I} \hat{Z} \quad (5.2.20)$$

Trở kháng trong mạch nối tiếp:

$$\hat{Z}_s = \sum_{i=1}^N \hat{Z}_i \quad (5.2.21)$$

Trở kháng trong mạch song song:

$$\hat{Z}_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{Z}_i}} \quad (5.2.22)$$

Với \hat{Z}_s là trở kháng hiệu dụng của N trở kháng \hat{Z}_i mắc nối tiếp, \hat{Z}_p là trở kháng hiệu dụng của N trở kháng mắc song song. Định luật Kirchhoff cũng áp dụng với pha dòng điện và pha hiệu điện thế trong mạch trở kháng phức tạp.

5.2.2.5 Năng lượng trong mạch AC

Bằng cách đo giá trị hiệu điện thế hiệu dụng và dòng điện hiệu dụng và nhân chúng với nhau, cũng giống như trong mạch DC, ta có thể có được giá trị năng lượng biểu kiến, S, là:

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (5.2.23)$$

Tuy nhiên, năng lượng biểu kiến, đo bằng đơn vị vôn-ampe (VA), có chút sai lệch. Cụ thể là, nó không tương đương với cả năng lượng đã bị tiêu thụ (trọng tải) và năng lượng được sinh ra (trong máy phát).

Năng lượng thực tế, P, được tính bằng cách nhân năng lượng biểu kiến với \cos của góc pha giữa hiệu điện thế và dòng điện:

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos(\phi) \quad (5.2.24)$$

Năng lượng thực tế được đo bằng đơn vị Watts (W).

Dòng điện chạy ra cuộn cảm không sinh ra năng lượng thực tế, mà sinh ra năng lượng phản ứng Q.

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin(\phi) \quad (5.2.25)$$

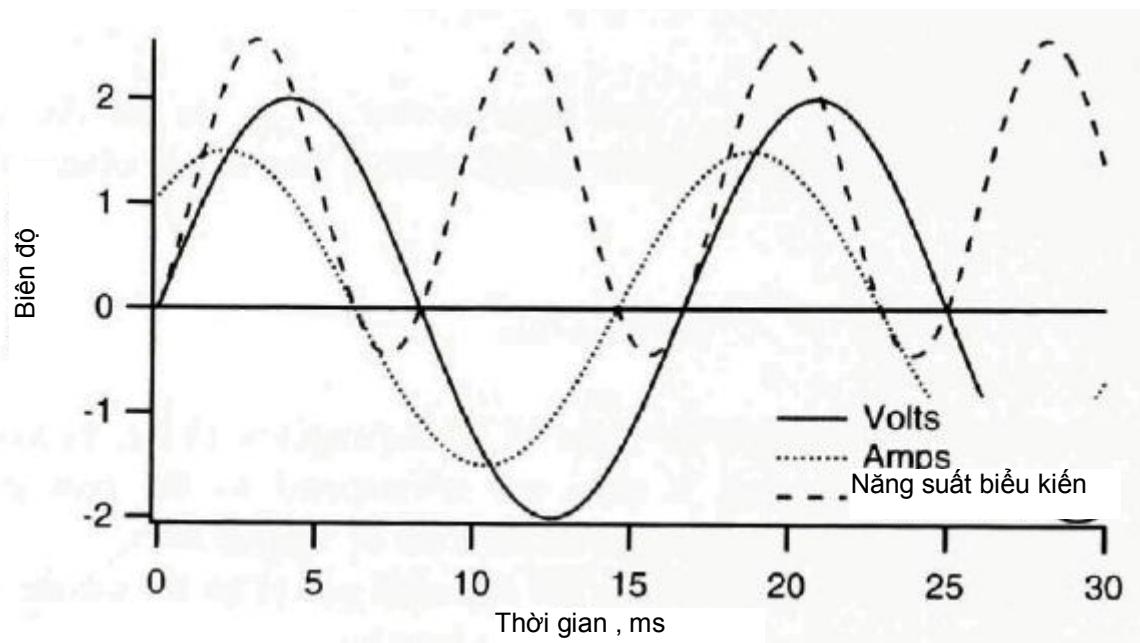
Năng lượng phản ứng, đo bằng đơn vị “vôn-ampe phản ứng” (VAR) là rất quan trọng vì nó luôn được sinh ra đâu đó trong hệ thống. Ví dụ, dòng điện tạo ra một từ trường trong máy phát điện sẽ sinh ra năng lượng phản ứng. Dòng điện phản ứng cũng gây ra tổn hao năng lượng lớn hơn trong quá trình truyền tải và phân phối điện, vì dây dẫn cũng có điện trở.

‘Hệ số năng lượng’ của một mạch điện hoặc thiết bị điện thể hiện một phần của năng lượng biểu kiến đó là năng lượng thực. Vì vậy, hệ số năng lượng là tỉ số năng lượng thực và năng lượng biểu kiến. Ví

độ, chỉ số năng lượng là 1 có nghĩa là tất cả năng lượng đều là năng lượng thực. Hệ số năng lượng được tính bằng cos của góc pha giữa hiệu điện thế và dòng điện, $\cos(\phi)$. Giá trị này được gọi là giá trị thê hệ số năng lượng. Trong mạch với dòng điện và hiệu điện thế hình sin, 2 loại giá trị này là bằng nhau. Trong mạch với dòng điện và hiệu điện thế không phải hình sin, giá trị thê hệ số năng lượng thích hợp để dụng hơn.

Các góc pha giữa dòng điện và điện áp được gọi là góc hệ số công suất, vì nó là cơ sở để xác định hệ số công suất. Điều quan trọng cần lưu ý rằng các góc hệ số công suất có thể là âm hay dương, tương ứng với liệu là sóng dòng điện dạng sin đến song điện áp dạng sin liệu hiện tại đang dẫn đầu làn sóng sin điện áp hoặc ngược lại, như đã nói. Theo đó, nếu các góc hệ số công suất là dương, hệ số công suất được cho là vượt pha. Nếu nó là âm hệ số công suất là trễ pha.

Một ví dụ về điện áp, dòng điện và công suất biến kién liên hệ với dạng sóng được chỉ ra trong hình 5.2 cho một mạch điện với 1 điện trở và 1 tụ điện. Đối với ví dụ này, dòng điện và điện áp lệch nhau goc pha bằng 45độ, vì thê hệ số công suất là 0.707. Sóng sin dòng điện đi trước sóng sin điện áp, vì thê hệ số công suất vượt pha.



Hình 5.2: Điện áp, AC, v , dòng điện, i , và công suất biếu kién, vi , trong mạch điện với một điện trở và một tụ điện.

Một ví dụ đơn giản của việc sử dụng các đường phasors để tính toán trong một mạch AC như sau. Xem xét một mạch đơn giản với một nguồn điện áp AC, 1 điện trở, 1 điện cảm, và một tụ điện được nối thành một vòng đơn. Kháng trở của điện trở là 4Ω , và kháng trở của điện cảm và tụ điện thứ tự là $j3 \Omega$ và $-j6 \Omega$. Điện áp được $100\angle 0^\circ$. Cần tìm dòng điện và công suất tiêu hao của điện trở.

Các giải: Các tổng số kháng trở, \hat{Z} , là $\hat{Z} = \hat{Z}_P + \hat{Z}_L + \hat{Z}_C = 4 + j3 - j6 = 4 - j3 = 5\angle -36,9^\circ$.

Dòng điện theo đó là $\hat{I} = \hat{V} / \hat{Z} = 20\angle 36,9^\circ$ công suất có thể được tìm thấy theo

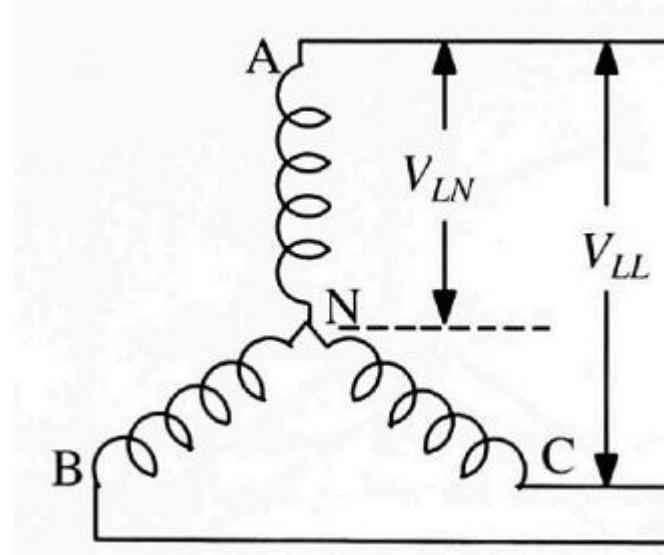
$$P = \left| \hat{I} \right|^2 R = 20^2 \cdot 4 = 1600W \text{ hay } P = \left| \hat{I} \right| \left| \hat{V} \right| \cos(36,9) = 1600W$$

Lưu ý việc sử dụng giá trị tuyệt đối cho các rms tương đương.

5.2.2.6 Công suất ba pha AC

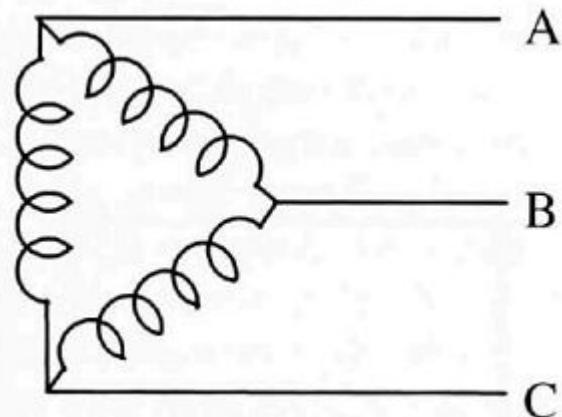
Năng lượng phát điện là tải điện năng lớn thường hoạt động trên hệ thống công suất 3 pha. Một hệ thống điện 3 pha là một trong đó điện áp cung cấp cho tải trọng trê các pha khác nhau xen lắn, cách nhau khoảng 120 độ ($2\pi/3$). Biến áp, máy phát điện hoặc động cơ 3 pha tiêng lẻ đều có các cuộn dây được sắp xếp theo một trong hai cách. hoặc. Đó là: (i) chữ Y (hoặc wye) và (ii) Δ (Delta), như minh họa trong

hình 5.3 và 5.4. Sự xuất hiện của các cuộn dây có thể giải thích các tên. Lưu ý rằng hệ thống Y có bốn dây (một trong số đó dây trung hòa), trong khi đó hệ thống Δ có ba dây.



Hình 5.3: Cuộn dây được mắc hình chữ Y

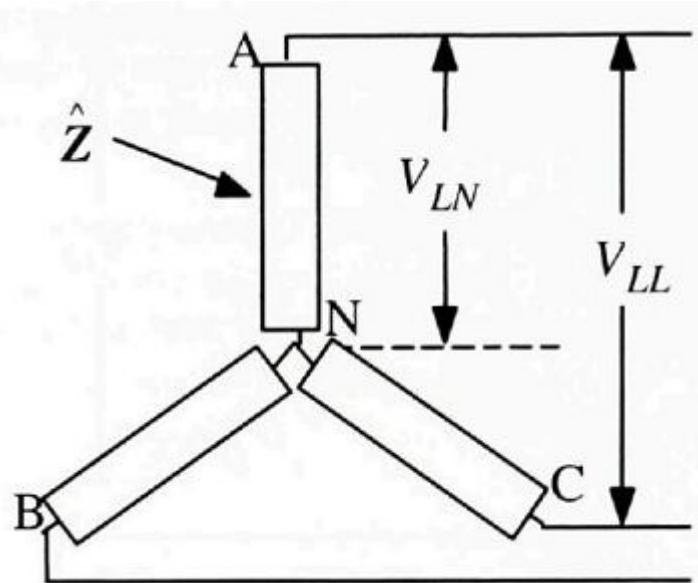
V_{LN} và V_{LL} lần lượt là điện áp dây nóng-dây nguội, điện áp đường dây-đường dây.



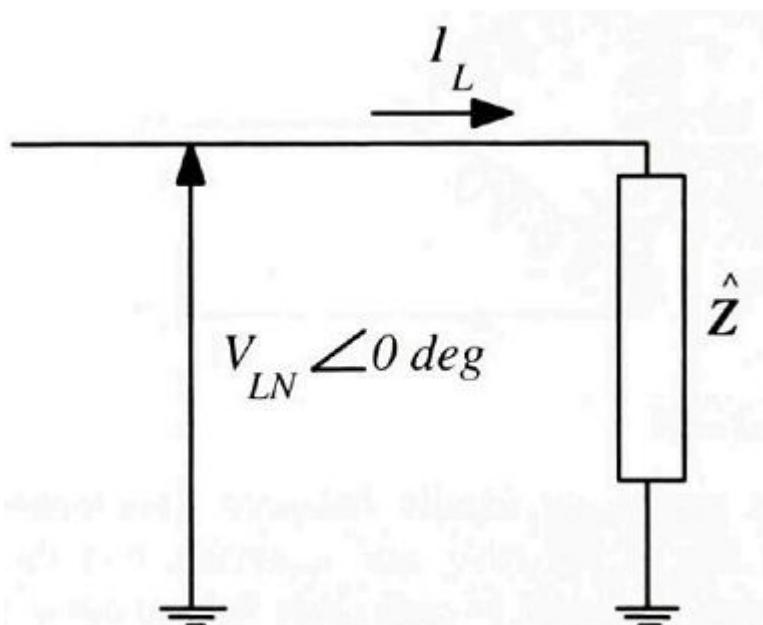
Hình 5.4: Mạch đấu tam giác

Tải trong hệ thống 3 pha bằng nhau. Điều đó nghĩa là trở kháng ở mỗi pha bằng nhau. Nếu vào trường hợp đó, và giả sử rằng hiệu điện thế ở các biên độ bằng nhau, sau đó dòng điện cũng bằng nhau nhưng lệch pha nhau 1 góc 120° . Hiệu điện thế trong hệ thống 3 pha có thể có điện áp dây nóng – dây nguội, V_{LN} hoặc điện áp đường dây-đường dây, V_{LL} . Các đại lượng này có thể được coi là điện áp đường dây (V_{LL}), hoặc điện áp pha (điện áp qua tải và dây). Dòng điện trong mỗi dây dẫn, bên ngoài đầu dây của tải được coi là dòng đường dây. Dòng điện qua tải được coi là dòng điện tải hoặc dòng điện pha. Nhìn chung, trọng tải được kết nối hình chữ Y cân bằng, dòng điện tải và dòng điện pha là bằng nhau, dòng điện trung hòa bằng 0, và điện áp đường dây-đường dây V_{LL} gấp $\sqrt{3}$ lần điện áp dây nóng- dây nguội, V_{LN} . Trọng tải được đấu tam giác, điện áp đường dây và điện áp pha bằng nhau, trong khi dòng điện qua dây gấp $\sqrt{3}$ lần dòng điện pha. Hình 5.5 minh họa tải 3 pha được nối hình chữ Y được giả sử cân bằng và tổng trở Z .

Nếu biết một hệ thống ba pha là cân bằng, nó có đặc điểm là một mạch tương đương một pha. Phương pháp này giả định một tải được kết nối hình chữ Y, trong đó mỗi trở kháng bằng Z . (tải được kết nối Δ có thể được sử dụng bằng cách áp dụng sự chuyển đổi $Y - \Delta$ phù hợp cho trở kháng, cho $\hat{Z}_Y = \hat{Z}_\Delta / 3$). Mạch tương đương một dòng là một pha bốn dây điện, mạch điện được mắc theo hình chữ Y có ba pha Y, ngoại trừ điện áp được sử dụng là điện áp dây nóng – dây nguội, với một góc pha ban đầu giả sử bằng không. Mạch tương đương một dòng được minh họa trong hình 5.6.



Hình 5.5: Tải được mắc hình chữ Y, V_{LN} và V_{LL} lần lượt là điện áp dây nóng-dây nguội, điện áp đường dây-đường dây, \hat{Z} là trở kháng.



Hình 5.6: Mạch tương đương 1 dòng, I_L là dòng điện trong hệ thống 3 pha, V_{LN} là điện áp dây nóng-dây nguội, \hat{Z} là trở kháng.

Chi tiết hơn về mạch điện 3 pha có thể xem thêm trong những phần về kĩ thuật điện, bao gồm Brown và Hamilton (1984).

Công suất trong tải 3 pha: Xác định công suất trong mạch 3 pha xét về những đại lượng có thể đo được dễ dàng là rất thuận tiện. Những đại lượng này thông thường sẽ là điện áp đường dây-đường dây và dòng điện của dây. Trong một tải được mắc hình tam giác đều, công suất mỗi pha bằng một phần ba công suất tổng. Công suất thực trong mỗi pha là P_1 , sử dụng điện áp đường dây-đường dây và dòng điện của dây I_p , ta có:

$$P_1 = V_{LL} I_p \cos(\phi) \quad (5.2.26)$$

Vì cường độ dòng điện của dây được tính theo công thức $I_L = \sqrt{3} I_p$, và mạch có 3 pha, nên công suất thực tổng là:

$$P = \sqrt{3}V_{LL}I_P \cos(\phi) \quad (5.2.27)$$

Tương tự, năng suất biểu kiến 3 pha tổng và cảng suất vô công là:

$$S = \sqrt{3}V_{LL}I_L \quad (5.2.28)$$

$$Q = \sqrt{3}V_{LL}I_L \sin(\phi) \quad (5.2.29)$$

Những mối liên hệ trên trong công suất 3 pha cũng được áp dụng cho tải được mắc hình chữ Y. Việc tính toán công suất trong các tải không đều không thuộc quy mô của bài viết này. Những độc giả quan tâm có thể tìm thêm thông tin trong bất kì cuốn sách nào về kĩ thuật hệ thống điện.

5.2.2.7 Mức điện áp

Một trong những lợi thế chính của công suất dòng xoay chiều là mức điện áp có thể thay đổi bằng cách sử dụng biến áp nguồn. Năng lượng có thể được sử dụng một cách rất thuận tiện và an toàn ở điện áp khá thấp, nhưng lại được chuyển thành mức điện áp cao hơn cho mục đích truyền và phân phối điện. Cụ thể hơn, năng lượng được bảo tồn trong suốt quá trình chuyển đổi để khi điện áp tăng thì cường độ dòng điện sẽ giảm. Điều này giúp giảm hao phí trong quá trình truyền và phân phối điện, và dùng những dây dẫn nhỏ hơn và ít tốn kém hơn rất nhiều.

Tua bin gió thông thường tạo ra năng lượng điện ở 480V (ở Hoa Kỳ) hoặc 690V (ở Châu Âu). Tuabin gió thường được nối với đường dây phân phối với điện áp khoảng từ 10kV đến 69kV. Xem thêm chương 8 để hiểu rõ hơn về hệ thống điện và sự kết nối trong lưới điện.

5.2.3 Các đặc tính cơ bản của nam châm điện

Các nguyên lý cơ bản chi phối các máy điện và máy biến áp ngoài các nguyên lý cơ bản về điện đã được tóm tắt ở trên là các nguyên lý về vật lý của nam châm điện. Giả sử rằng độc giả đã quen thuộc với các quan niệm cơ bản về nam châm điện, những nguyên lý này sẽ được tóm tắt dưới đây. Bạn có thể tìm hiểu kĩ hơn trong các tài liệu về máy điện. Chỉ bằng quan sát, chúng ta cũng có thể thấy rằng cường độ trường nam châm trong 1 nam châm điện là 1 hàm của dòng điện. Lực sinh ra là do từ trường là 1 hàm mật độ từ thông. Điều này phụ thuộc vào vật liệu trong từ trường cũng như là mật độ của từ trường.

5.3.2.1 Định luật Ampere

Dòng điện trong dây dẫn sinh ra một từ trường có mật độ H gần dây dẫn. Phương trình sau miêu tả định luật Ampere:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\ell = I \quad (5.2.30)$$

Định luật này liên quan đến dòng điện trong dây dẫn, I với tích phân theo đường l quanh dây dẫn.

5.2.3.2 Mật độ từ thông và từ thông

Mật độ lượng từ thông, \mathbf{B} (Wb/m^2) liên quan đến mật độ lượng từ thông do độ thẩm từ, μ của vật liệu trong trường đang diễn ra:

$$B = \mu H \quad (5.2.31)$$

Trong đó $\mu = \mu_0 \mu_r$ là độ thấm từ (Wb/A-m) có thể được minh họa là tích của 2 thành phần μ_0 là độ thấm từ trong không gian tự do, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Wb/A-m, và μ_r là độ thấm từ tỷ đối không thứ nguyên của vật liệu.

Độ thấm từ củ kim loại không nhiễm từ rất giống với độ thấm từ của không gian tự do, vì thế độ thấm từ tỷ đối, μ_r gần đạt giá trị 1.0. Độ thấm từ tỷ đối của kim loại sắt từ rất cao, ở trong khoảng từ 10^2 đến 10^3 . Kết quả là các kim loại sắt từ được sử dụng trong lõi cuộn dây trong các máy biến thế và máy điện để tạo ra từ trường mạnh.

Những quy luật này có thể được áp dụng để phân tích từ trường trong 1 cuộn dây điện. Dòng điện chạy trong 1 cuộn dây sẽ tạo ra từ trường mà độ mạnh của từ trường tỷ lệ thuận với dòng điện và số lượng vòng dây trong cuộn dây, N . Trường hợp đơn giản nhất là solenoid, nó là 1 mảnh dây điện dài được cuộn trong 1 hình xoắn ốc được bó chặt. Hướng của từ trường song song với trục của solenoid. Áp dụng định luật Ampere, ta có biên độ của mật độ từ thông trong solenoid có chiều dài L là:

$$B = \mu I \frac{N}{L} \quad (5.2.32)$$

Mật độ từ thông là một hằng số tương đối qua mặt cắt ngang bên trong cuộn dây.

Từ thông, Φ (Wb) là tích phân của tích giữa mật độ từ thông và diện tích mặt cắt ngang A qua nó, được xác định như sau:

$$\Phi = \int B \bullet dA \quad (5.2.33)$$

Lưu ý điều kiện để tích phân xác định, thông qua tích, hướng của bề mặt nơi mà mật độ từ thông được xác định cũng như hướng của mật độ từ thông. Ví dụ, từ thông bên trong 1 cuộn dây tỷ lệ thuận với cường độ từ trường và diện tích mặt cắt ngang A của cuộn dây:

$$\Phi = BA \quad (5.2.34)$$

5.2.3.3 Định luật Faraday

Một từ trường biến thiên sẽ sinh ra một sức điện động (EMF, hay điện áp)

E trong dây dẫn nằm trong từ trường. Đại lượng này tuân theo quy luật của Faraday về dòng điện cảm ứng:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (5.2.35)$$

Chú ý dấu hiệu nhỏ nhất trong đẳng thức trên. Điều này cho thấy đường đi của dòng điện cảm ứng theo một chiều mà chống lại sự thay đổi sinh ra nó. (Định luật Lenz). Cũng cần phải chú ý là trong bài này, E được sử dụng để chỉ điện áp cảm ứng, trong đó V được sử dụng để chỉ điện áp ở các cực của thiết bị.

Theo định luật Faraday, một cuộn cảm trong từ trường biến thiên sẽ có lực cảm ứng từ EMF trong nó, dòng điện này tỷ lệ với số vòng dây:

$$E = -\frac{d(N\Phi)}{dt} \quad (5.2.36)$$

$\Lambda = N\Phi$ thường đề cập tới độ rò rỉ dòng trong thiết bị

5.2.3.4 Lực cảm ứng

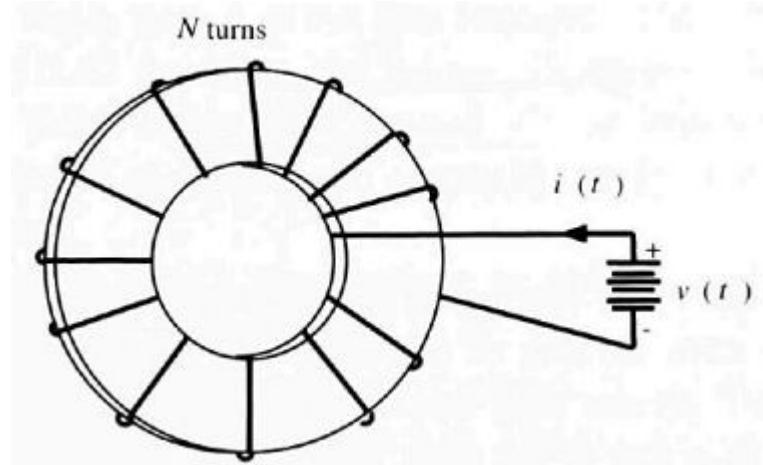
Một dòng chạy qua dây dẫn có từ trường sẽ gây ra một lực cảm ứng lên trên dây dẫn đó. Đây là tính chất cơ bản của động cơ. Tương tự, một dây dẫn có lực chạy qua từ trường sẽ có dòng bị cảm ứng trong nó. Đây là tính chất cơ bản của những máy phát điện. Trường hợp khác, lực dF trong dây dẫn có độ dài dl (một vectơ), dòng điện v và từ trường dB liên quan với nhau trong đẳng thức vecto sau:

$$dF = Idl \cdot dB \quad (5.2.37)$$

Chú ý dấu nhân trong công thức 5.2.37. Dấu này là dây dẫn ở góc bên phải của từ trường khi lực sinh ra là lớn nhất. Lực này vuông góc với từ trường và dây dẫn

5.2.3.5 Tù trớ

Rất hữu ích để xem xét một vài mạch từ trường đơn giản. Ví dụ, giả sử là lõi của cuộn dây hình xuyến như được chỉ ra trong hình 5.7 được quấn N vòng dây và có dòng $i(t)$ chạy trong cuộn dây này



Hình 5.7: Mạch từ đơn giản; $i(t)$ dòng tức thời; $v(t)$. điện áp tức thời

Định luật Ampe có thể được áp dụng trong việc sử dụng sự tích hợp theo chu kỳ vào trong lõi cuộn. Kết quả là cường độ từ trường bên trong lõi dây là:

$$H_c = \frac{Ni}{2\pi r} \quad (5.2.38)$$

Trong đó r = radian là khoảng cách từ lõi của cuộn dây hình xuyến. Ở đây lượng Ni đôi lúc đề cập tới lực từ động (MMF) điều khiển dòng

Cường độ từ trường bên ngoài cuộn dây bằng 0 (bỏ qua từ trường ở cuộn dây mà đường kính được giả sử là rất nhỏ so với đường kính của cuộn dây hình xuyến). Đánh giá cường độ từ trường ở điểm giữa lõi dây và giả sử là nó không đổi khi đi qua thiết diện của lõi dây, kết quả là:

$$H_c = \frac{Ni}{2\pi(r_i + r_0)/2} = \frac{Ni}{l_c} \quad (5.2.39)$$

Trong đó lc = độ dài của lõi dây ở điểm chính giữa

Dòng từ trong lõi dây được tìm ra dựa vào công thức sau 5.2.39, 5.2.31, 5.2.33

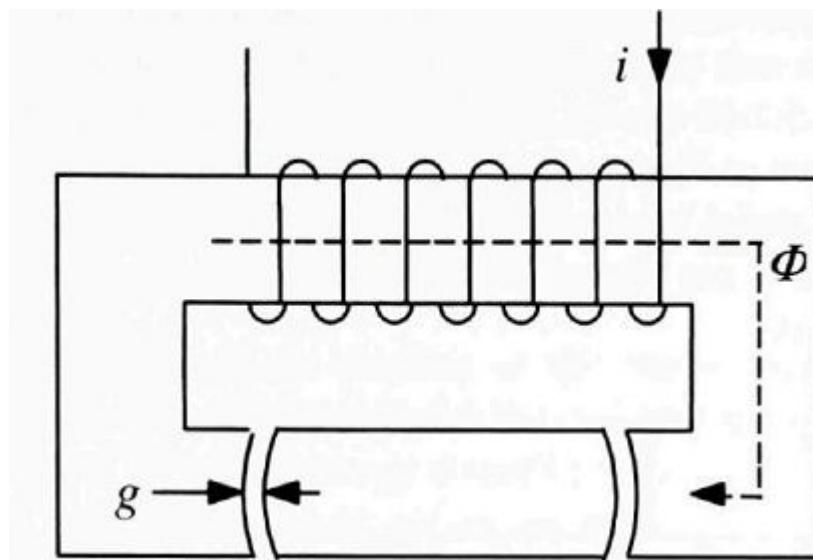
$$\Phi = \int B \bullet dA = \frac{\mu Ni A_c}{l_c} = \frac{Ni}{l_c / \mu A_c} \quad (5.2.40)$$

Trong đó A là diện tích thiết diện của lõi dây. Tỷ lệ của lực từ động được coi như là từ trở, Re ($A-t/Wb$) và có thể được coi như là điện trở để sinh ra dòng từ bởi lực từ động. Trong công thức trên, từ trở của lõi dây là $Re_c = l_c / \mu A_c$

Ta hãy xét tiếp tới thiết bị từ tương tự với trên chiều rộng có hai lõi khí g trong lõi dây (xem hình 5.8). Xét phép xấp xỉ gần đúng, có thể giả thiết rằng dòng từ vẫn giữ nguyên trong lõi dây và trong lõi khí. Trong trường hợp này, dòng từ trong lõi dây và trong hai lõi khí phải giống nhau. Từ định luật Ampe, dòng từ là:

$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} + \frac{2g}{\mu_0 A_g}} \quad (5.2.41)$$

Trong đó A_g là diện tích thiết diện của lỗ khí. Trong trường hợp này, diện tích bề mặt thiết diện của lỗ khí bằng với diện tích thiết diện của lõi dây. Độ dẫn từ tương đối của vật liệu mang từ thường lớn hơn 10^4 so với độ dẫn từ của lỗ khí. Vì vậy, từ trở của lỗ khí sẽ lớn hơn từ trở của lõi dây. Thậm chí nếu lỗ khí có chiều dài bằng $1/10$ lõi dây, chúng làm giảm dòng từ trong thiết bị rất nhiều. Dòng từ trong các máy phát điện đi qua các lỗ khí từ những phần tĩnh tới phần quay của hệ thống. Thông thường, việc giữ những lỗ khí này hẹp tới mức có thể là rất quan trọng



Hình 5.8: Thiết bị từ đơn giản; g, chiều rộng của lõi khí; Φ , dòng từ. Từ các máy điện, được xuất bản lần đầu của Sarma vào năm 1985 dưới sự cho phép của Brooks/ Cole, một sản phẩm của Nhà xuất bản Wadsworth Group, cùng với Thomson Learning. Fax: 800 730-2215

5.2.3.6 Tích trữ năng lượng trong từ trường

Năng lượng được tích trữ trong từ trường trong một thiết bị điện cơ. Việc chuyển hóa năng lượng trong những thiết bị này liên quan tới việc trao đổi năng lượng cơ học và điện thông qua những sự thay đổi trong năng lượng được lưu trữ trong các miền từ trường. Trong khi thảo luận về tích trữ năng lượng trong các miền từ vượt xa phạm vi của bài này, chúng ta sẽ nghiên cứu cách sử dụng tích trữ năng lượng để xác định lực momen xoắn trong thiết bị đơn giản để giúp sinh viên hiểu thêm về các máy điện.

Việc xác định lực momen xoắn trong máy điện sử dụng công thức 5.2.37 là rất khó trừ khi biết mật độ dòng và miêu tả bằng hình học của hệ thống này. Đối với các hệ thống phức tạp, lực momen xoắn có thể được xác định theo sự cân bằng năng lượng, có thể được trình bày trong công thức sau:

$$Q_e = -\frac{\partial E_m(i, \theta)}{\partial \theta} + i \frac{\partial \lambda(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (5.2.42)$$

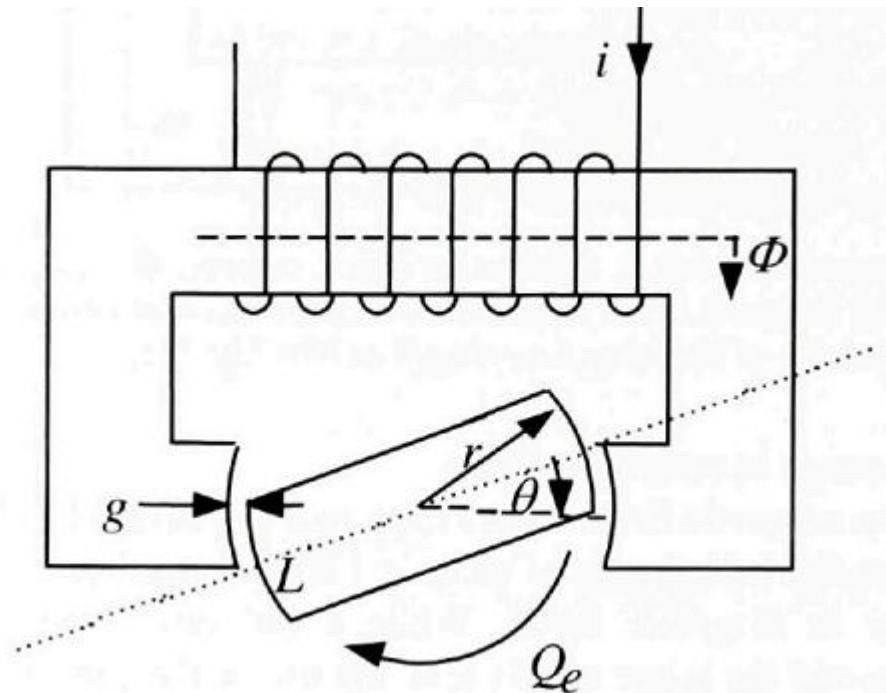
Trong đó Q_e là lực momen xoắn điện, G là góc quay của thiết bị, E_m là năng lượng được tích trữ trong các miền từ trường và λ là độ rò rỉ dòng (được xác định ở trên). Hệ số đầu tiên bên phải của công thức 5.2.42 miêu tả lực momen xoắn được tạo ra từ sự thay đổi của năng lượng được tích trữ trong miền từ trường khi roto quay. Hệ số thứ hai ở bên phải miêu tả lực momen xoắn là một yếu tố dẫn đến sự thay đổi về năng lượng điện qua hệ thống khi vị trí của roto thay đổi.

Nhằm để sử dụng công thức 5.4.42, ma rất cần để có thể diễn tả năng lượng được tích trữ trong miền từ trường. Nói chung là năng lượng được tích trữ trong từ miền từ của lõi khí của máy điện là lớn hơn so với được tích trữ trong vật liệu từ. Người ta thường giả thiết rằng tất cả năng lượng trong các miền từ trường là ở trong lõi khí. Năng lượng có trên mỗi dung tích được tích trữ trong miền từ trường e_m trong lõi khí là:

$$e_m = \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{A_g^2 \mu_0} = \frac{1}{2} \mu_0 H_g^2 \quad (5.2.43)$$

Trong đó chỉ số dưới dòng g chỉ lượng liên quan tới lõi khí. Tổng năng lượng trong từ trường của lõi khí là năng lượng trên một đơn vị thể tích được nhân lên đôi vì thể tích trường của lõi khí.

Cách dùng công thức 5.2.42 có thể được minh họa bởi ví dụ của Sarma năm 1985. Chúng ta hãy xét thiết bị từ được thể hiện trong hình 5.9. Thiết bị này tương tự với thiết bị được trình bày ở trên. Hình 5.8, trừ vật liệu giữa các lõi khí sẽ được đề cập tới khi roto quay. Khi roto không xếp thẳng hàng với lõi ($\theta = 0$), lực momen xoắn sẽ cố gắng để xếp chúng thẳng hàng với nhau



Hình 5.9: Thiết bị lực momen xoắn từ đơn giản; g , chiều rộng của lõi khí; i , dòng điện; Φ , dòng từ; L , chiều dài của bè mặt hai cực; Q_e , lực momen xoắn điện; r , bán kính, θ , góc quay. Từ Electric Machines, xuất bản lần đầu của Sarma (1985). Được xuất bản lại dưới sự cho phép của Brooks/Cole, một án phẩm của Wadsworth Group, với sự cộng tác của Thomson Learning. Số fax: 800 730-2215.

Một số giả thiết làm đơn giản hóa sẽ được đưa ra trong sự phân tích sau:

- Diện tích thiết diện của từ trường lõi khí được giả thiết là bằng với diện tích thiết diện của lõi dây. Trên thực tế, diện tích thiết diện của từ trường trong lõi khí sẽ lớn hơn so với diện tích thiết diện của lõi.
- Không có sự rò rỉ.
- Tất cả năng lượng được tích trữ trong các miền từ của lõi khí.
- Không có sự tổn hao trong hệ thống.
- Từ trở của lõi khí lớn hơn trong lõi dây.

Từ công thức 5.4.41, dòng gây ra từ trở trong hệ thống. Từ trở của lõi khí là yếu tố của độ dài và diện tích thiết diện mà tăng từ 0 tới A_c , khi θ tăng từ 0 tới L/r , trong đó L là độ dài bề mặt của mỗi cực. Dòng được tính như sau:

$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} + \frac{2g}{\mu_0 A_g (r\theta / L)}} \quad (5.2.44)$$

Nhận thấy từ trở của lõi khí lớn hơn rất nhiều từ trở của lõi dây, dòng từ có thể xấp xỉ :

$$\Phi \approx \frac{Ni \mu_0 A_g}{2g} \left(\frac{r\theta}{L} \right) \quad (5.2.45)$$

Năng lượng được tích trữ trong từ trường là kết quả của năng lượng trên mỗi đơn vị thể tích (Công thức 5.4.43). Thể tích của từ trường có thể bao gồm hai lõi khí, tăng từ 0 tới $2gA_g$ và tăng từ 0 tới L/r . Vì vậy, năng lượng được tích trữ trong từ trường là:

$$E_m = \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{\mu_0 A_g^2} \left(2gA_g \frac{r\theta}{L} \right) \quad (5.2.46)$$

Sử dụng công thức 5.4.45 để tính dòng, ta có:

$$E_m \approx \frac{1}{2} \frac{N^2 i^2 \mu_0}{4g^2} \left(\frac{r\theta}{L} \right)^2 \left(2gA_g \frac{r\theta}{L} \right) \quad (5.2.47)$$

Sử dụng công thức dưới đây để tính lực momen xoắn, công thức 5.4.42 và công thức 5.2.47 và công thức 5.2.45 và định nghĩa độ rò rỉ dòng. Sau khi đơn giản hóa ta có:

$$Q_e = \frac{1}{2} \frac{N^2 i^2 \mu_0}{4g^2} \left(\frac{2gA_g r}{L} \right) \left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{r\theta}{L} \right)^2 \right) \quad (5.2.48)$$

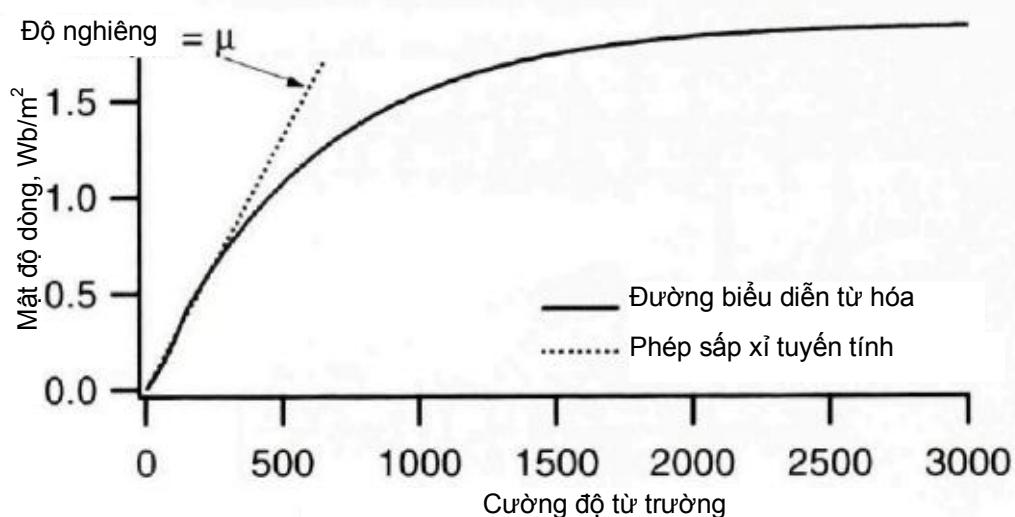
Trong công thức này, lực momen xoắn cao khi roto quay mà không thẳng hàng ($G = 0$) và giảm khi roto quay thẳng hàng với lõi dây. Đạt tới một góc là L/r khi cực của roto được xếp thẳng hàng với lõi dây và lực momen xoắn được tính là âm. Kết quả này từ sự đơn giản hóa được sử dụng để phân tích. Tuy nhiên, việc phân tích chỉ ra roto gần đạt tới các cực cụ thể trong từ trường. Dòng càng lớn thì số vòng càng lớn, lực momen xoắn càng lớn. Lõi khí càng lớn thì từ trở càng lớn và lực momen xoắn càng nhỏ.

5.2.3.7 Xem xét các yếu tố khác

Trong một số thiết bị cơ điện trong thực tế, xem xét các yếu tố khác ảnh hưởng tới hoạt động của máy bao gồm sự rò rỉ và tổn hao dòng trễ và ảnh hưởng của sự bão hòa và độ trễ không tuyến tính. Từ

trường có thể không bao giờ bị giới hạn tại những nơi mà chúng hoạt động hữu ích. Bởi vì điều này nên tổn hao không nhiều. Điều này bao gồm tổn hao do rò rỉ trong máy biến áp và các máy điện. Tác động của tổn hao do rò rỉ là để làm giảm từ trường từ việc dự tính dòng trong trường hợp lý tưởng. Dòng trễ là dòng không mong muốn và là dòng sơ cấp bị cảm ứng trong các phần của mạch khi đi qua dòng thay thế. Những điều này làm tổn hao năng lượng.

Các chất sắt từ như được sử dụng trong động cơ điện thường có tính chất không tuyến tính. Ví dụ, mật độ dòng từ tính, B , không luôn luôn tỷ lệ với cường độ từ trường, H , đặc biệt ở mức độ cao hơn. Tại một số điểm, B ngừng tăng mặc dù H vẫn đang tăng. Đây được gọi là sự bão hòa. Tính chất của chất từ được thể hiện rõ nhất trong đường biểu diễn từ hóa. Một ví dụ của đường này được trình bày trong hình 5.10. Hiện tượng không tuyến tính khác ảnh hưởng tới thiết kế máy điện được gọi là độ trễ. Điều này mô tả tình trạng chung khi vật liệu bị nhiễm từ một phần, vì vậy B không biến thiên cùng với H khi H giảm theo cùng một cách thức thì H lại tăng



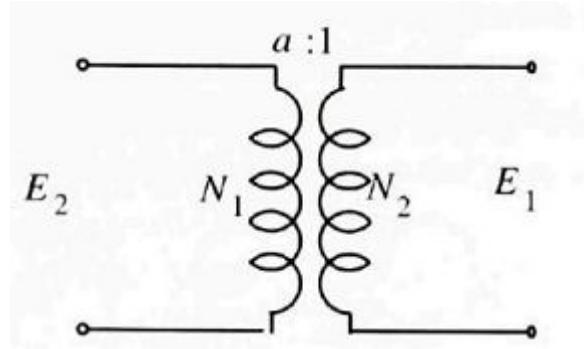
Hình 5.10: Mẫu đường biểu diễn từ hóa, μ : độ dãn từ

5.3 Bộ biến áp công suất

Bộ biến áp công suất là thành phần quan trọng trong bất cứ hệ thống điện xoay chiều. Phần lớn việc lắp đặt tuabin gió bao gồm ít nhất một bộ biến áp để chuyển điện được phát ra thành điện áp của mạng điện khu vực mà được nối với tuabin.Thêm vào đó, các bộ biến áp khác có thể được sử dụng để có được điện áp tại các mức độ phù hợp cho thiết bị phụ thuộc vào điện khác nhau tại nơi đó (đèn, hệ thống điều khiển và giám sát, công cụ, máy nén,...). Bộ biến áp được tính bằng kVA. Bộ biến áp phân phối nằm trong dải từ 5-50 kVA và có thể lớn hơn phụ thuộc vào ứng dụng. Bộ biến áp tại trạm biến thế là từ 1000 kVA – 600000 kVA.

Một bộ biến áp là một thiết bị có 2 hay nhiều lõi trong đó có dòng từ tính ảnh hưởng lẫn nhau. Bộ biến áp thường gồm có rất nhiều dây bọc quanh một lõi kim loại được dát mỏng. Trong phần lớn các trường hợp, bộ biến áp có 2 cuộn, một cuộn được gọi là cuộn thứ cấp, cuộn kia là cuộn sơ cấp. Dây thường được làm từ đồng và được cân nhắc về kích thước để có điện trở nhỏ nhất. Cuộn bao gồm các tẩm kim loại được dát mỏng được tách biệt nhau để dòng xoáy chạy quanh cuộn là nhỏ nhất.

Nguyên lý hoạt động của bộ biến áp được dựa theo Luật về cảm ứng từ của Faraday (phần 5.2.3.3). Một bộ biến áp lý tưởng là một bộ mà (i) không có sự tổn hao trong các cuộn, (ii) không có sự tổn hao trong lõi và (iii) là không có sự rò rỉ dòng. Một biểu đồ mạch điện của một bộ biến áp lý tưởng được minh họa trong hình 5.11.



Hình 5.11: Bộ biến áp lý tưởng, a: tỷ lệ vòng, E: điện áp cảm ứng, N: số vòng; Chỉ số dưới dòng 1 và 2 để cập tới cuộn sơ cấp và thứ cấp.

Giả sử E_1 được áp dụng cho cuộn sơ cấp của bộ biến áp lý tưởng với các cuộn N_1 là cuộn sơ cấp và cuộn N_2 là cuộn thứ cấp. Tỷ lệ giữa điện áp đi qua cuộn thứ cấp và sơ cấp bằng với tỷ lệ số vòng:

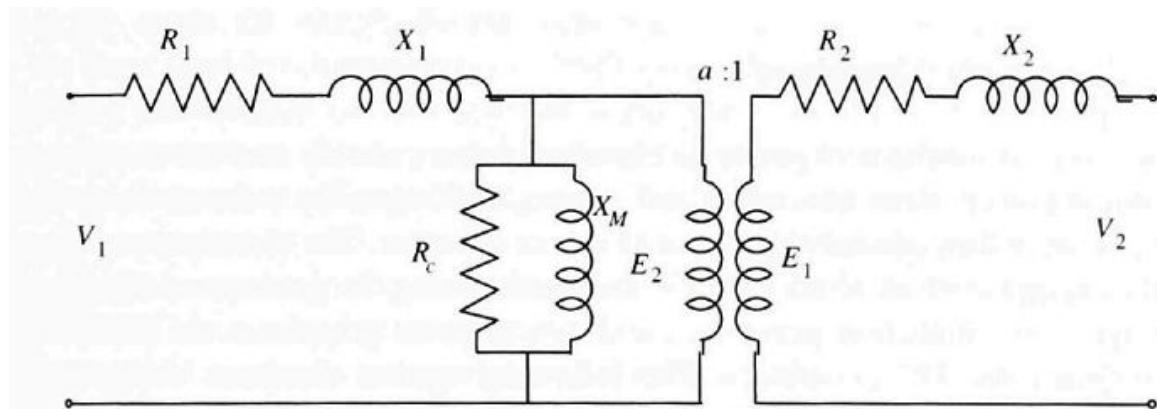
$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = a \quad (5.3.1)$$

Thông số a là tỷ lệ vòng của bộ biến áp

Dòng sơ cấp và thứ cấp tỷ lệ nghịch với số vòng (khi chúng ta giữ mức công suất và sản phẩm IV không đổi).

$$I_2/I_1 = N_1/N_2 = a \quad (5.3.2)$$

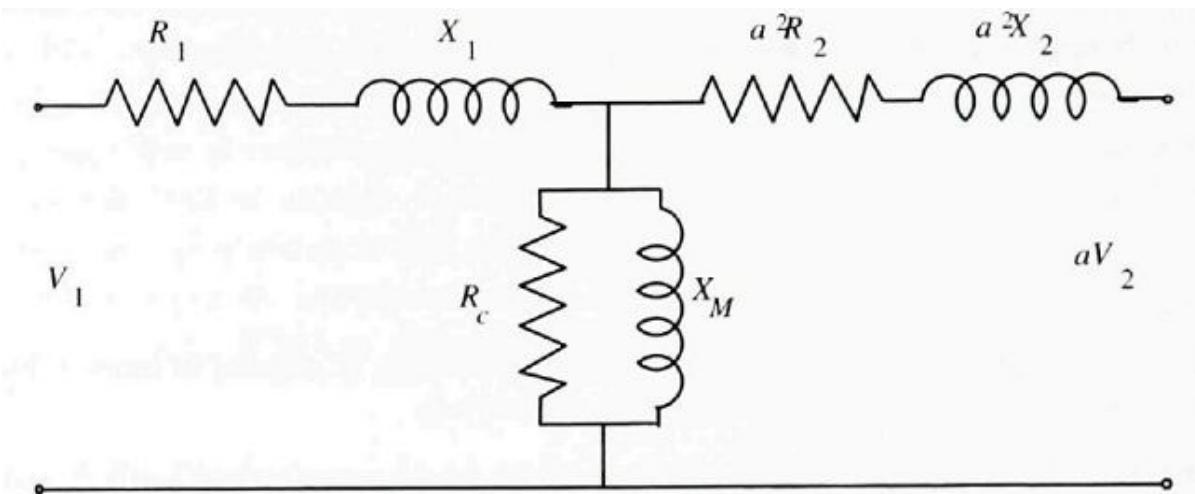
Các bộ biến áp thực không lý tưởng không có sự mất mát trong lõi và các cuộn, đồng thời sự rò rỉ dòng. Bộ biến áp lý tưởng được biểu diễn bởi mạch tương ứng dưới đây.



Hình 5.12: Bộ biến áp không lý tưởng, chú giải xem phần dưới đây

Trong hình 5.12 R gọi là điện trở, X gọi là điện kháng, 1 và 2 tương ứng là các cuộn cảm sơ cấp, thứ cấp. R_1 và R_2 là trở kháng của cuộn sơ cấp và thứ cấp. X_1 và X_2 là cảm kháng bị rò rỉ của 2 cuộn. Chỉ số dưới dòng M là cảm kháng bị nhiễm từ và chỉ số dưới dòng c là chỉ trở kháng lõi. V là điện áp giữa các cực và E_1 và E_2 là điện áp tự cảm ở cuộn sơ cấp và thứ cấp có tỷ lệ là tỷ lệ vòng.

Các thông số trên cuộn khác của cuộn cảm có thể được lấy từ cuộn này. Hình 5.13 miêu tả mạch máy biến áp tương ứng ở bên cuộn thứ cấp.



Hình 5.13: Máy biến áp không lý tưởng, để cập tới cuộn thứ cấp, chú giải xem trong bài viết

Liệu bộ biến áp sẽ hút dòng nếu có hay không có tải trên nó. Có sự mất mát ở trong dòng và các hệ số năng lượng sẽ không khác nhau nhiều. Độ lớn của sự mất mát và hệ số công suất có thể được ước lượng nếu biết trở kháng và điện kháng trong hình 5.13. Các thông số này có thể được tính bằng hai cách sau: (i) đo điện áp, dòng và cường độ ở biến áp không tải (mạch hở trên một trong những cuộn cảm) và (ii) đo điện áp, dòng và cường độ với một trong những cuộn cảm bị ngắn mạch. Bài kiểm tra tiếp theo sẽ là điện áp giảm để giúp cho bộ biến áp không bị cháy. Hầu hết các bài nói về máy điện đều miêu tả các bài kiểm tra rất chi tiết. Ví dụ, Nasar và Unnewehr (1979).

Cần phải chú ý là mạch tương ứng của bộ biến áp trong nhiều phương diện là giống với các máy điện cảm ứng mà sẽ được trình bày trong phần 5.4.4 và được sử dụng như máy phát điện trong các tuabin gió.

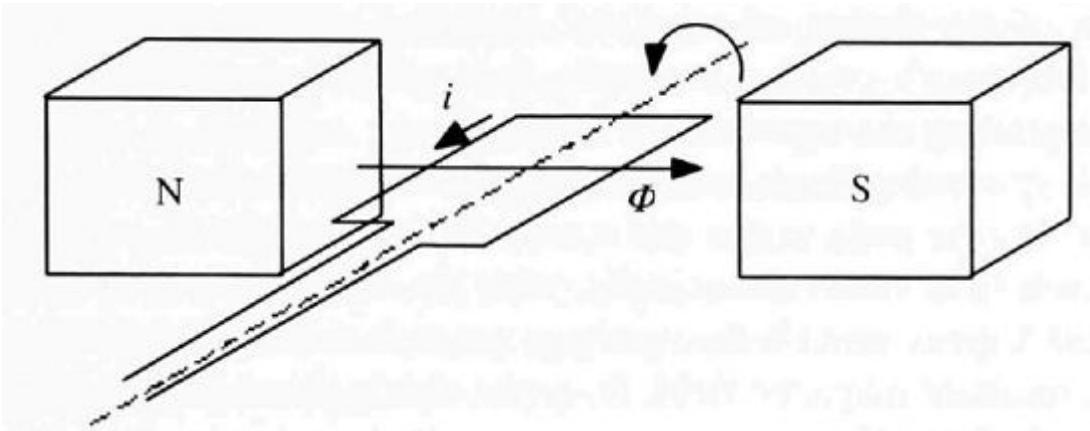
5.4 Các máy điện

Máy phát điện chuyển cơ năng thành điện năng, các động cơ chuyển điện năng thành cơ năng. Cả hai máy phát điện và động cơ thường được coi như là các máy điện bởi vì chúng có thể hoạt động khi là máy này khi là máy khác. Các máy điện thường được lắp vào tuabin gió mà hoạt động như máy phát điện. 2 loại máy phát điện phổ biến nhất là máy phát điện cảm ứng và máy phát điện đồng bộ.Thêm vào đó, một số tuabin nhỏ hơn sử dụng máy phát điện một chiều. Phần sau sẽ nói về nguyên lý của các máy điện nói chung và sau đó tập trung vào máy phát điện cảm ứng và đồng bộ.

5.4.1 Các máy điện đơn giản

Rất nhiều đặc điểm quan trọng của các máy điện là rất rõ ràng trong hoạt động của máy điện đơn giản nhất như được trình bày trong hình 5.14.

Trong máy điện đơn giản này, hai cực nam châm (hoặc cặp nam châm) sẽ tạo ra từ trường. Vòng dây là lõi. Lõi có thể quay và nó được giả thiết rằng có chổi quét và vành gốp điện hoặc ống gốp để cho phép dòng đi từ khung cố định tới khung quay. Ống gốp được sử dụng trong các máy phát điện dòng điện một chiều để thay đổi dòng điện một chiều hay xoay chiều. Nếu dòng đi qua cổ gốp, một lực sẽ tác động lên dây. Lực này nằm ở phía bên trái đi xuống và bên khác ở bên phải đi lên. Sau đó lực này sẽ sinh ra mômen xoắn làm cho máy hoạt động như là một động cơ. Trong máy này, momen xoắn sẽ lớn nhất khi cuộn cổ gốp nằm ngang và nhỏ nhất (bằng 0) khi cuộn này nằm dọc.



Hình 5.14: Máy điện đơn giản, i : dòng điện, Φ đường lực từ, N cực từ trường Bắc, S: cực từ trường Nam

Ngược lại, nếu không có dòng điện chạy trong dây, nhưng có một từ trường bao quanh lõi cuộn, một điện áp sẽ được sinh ra theo Định luật Faraday. Nếu cuộn là một phần của một mạch khép kín, sẽ có dòng điện chạy qua. Trong trường hợp này, máy điện đóng vai trò là một máy phát điện. Nói chung, các hướng của dòng điện hay điện áp, vận tốc, hướng của lực từ trường và lực được xác định qua các mối liên hệ giữa các bộ phận

Khi vành góp điện được sử dụng, sẽ có 2 vòng kim loại được gắn vào trực truyền động của lõi và một vòng được nối với điểm cuối của cuộn cảm của lõi và vòng khác được nối với lõi khác. Chổi quét trên vành góp điện cho phép dòng điện qua tải. Khi lõi quay, hướng của điện áp sẽ phụ thuộc vào vị trí của cuộn dây trong từ trường. Trên thực tế điện áp sẽ biến thiên theo hình sinnus lõi quay với tốc độ nhất định. Trong cách thức này, máy điện đơn giản này đóng vai trò như một máy phát điện xoay chiều. Tương tự trong vai trò giám sát, lực (và cả lực momen xoắn) sẽ ngược lại trong suốt quá trình biến đổi

Ông góp đơn giản cho loại máy điện này bao gồm hai bộ phận, mỗi ông góp quay quanh lõi 180^0 . Chổi quét sẽ kết nối với một phần tại một thời gian nhất định nhưng chính cặp chổi quét của bộ phận này sẽ quay ngược lại một lần trong mỗi lần thay đổi. Sau đó, điện áp cảm ứng bao gồm một chuỗi dạng sóng nửa hình sin, tất cả đều giống nhau. Trong cách thức giám sát, lực momen xoắn luôn luôn có cùng một hướng. Nguyên lý của ông góp là nền tảng của máy phát điện và động cơ một chiều thông thường giống với máy điện đơn giản nhưng cũng có một số điểm khác nhau:

- Trong các máy có từ trường do các nam châm vĩnh cửu tạo ra, từ trường thường tạo ra điện
- Từ trường thường có ở hầu hết các phần quay của máy (roto), trong khi đó phần ứng điện là nằm ở phần tĩnh (stato).
- Cũng có một từ trường được sinh ra từ phần ứng điện mà tương tác với từ trường của roto. Kết quả của từ trường thường là mối quan tâm chính trong việc phân tích hoạt động của máy điện.

5.4.2. Từ trường bao quanh

Khi sắp xếp các cuộn phù hợp trong máy điện có thể tạo ra một từ trường bao quanh, thậm chí nếu các cuộn dây cố định. Tính chất này tạo ra một cơ sở quan trọng trong việc thiết kế các máy điện xoay chiều. Nói một cách cụ thể, có sự tương tác giữa từ trường quay quanh staton với từ trường quay quanh roto, điều này chỉ ra đặc điểm hoạt động của máy.

Nguyên lý từ trường quay quanh có thể được phát triển theo nhiều cách nhưng điều quan trọng cần phải chú ý là (1) các cuộn trong staton cách nhau 120^0 ($2\pi/3$ radian), (2) độ lớn của mỗi từ trường biến thiên theo hình sin với dòng điện ở mỗi giai đoạn khác với các giai đoạn khác 180^0 và (3) các cuộn theo sự phân bố đó của mỗi từ trường tỷ lệ theo hình sin. Kết quả từ trường, H , được thể hiện bằng dạng pha trong 3 miền từ trường riêng rẽ H .

$$H = H_1 \angle 0 + H_2 \angle 2\pi/3 + H_3 \angle 4\pi/3 \quad (5.4.1)$$

Dòng được nối theo hình sin và cho một giá trị C không đổi tùy ý có nghĩa là được từ trường được sinh ra từ dòng, ta có:

$$H = C[\cos(2\pi ft)\angle 0 + \cos(2\pi ft + 2\pi/3)\angle 2\pi/3 + \cos(2\pi ft + 4\pi/3)\angle 4\pi/3] \quad (5.4.2)$$

Sau khi biểu diễn số học, chúng ta có kết quả là độ lớn của H là không đổi và vị trí góc là $2\pi ft$ radian. Kết quả sau đó chỉ ra từ trường đang quay với tốc độ số vòng quay không đổi trên giây, giống như tần số hệ thống điện. Một sự miêu tả bằng đồ họa của kết quả này có thể tìm thấy qua đường link trên trang web của phòng thí nghiệm nghiên cứu năng lượng tái tạo của trường Đại học Massachusetts

Trên đây đã thảo luận về cặp cực nam châm ở mỗi pha. Chúng ta có thể hoàn toàn sắp xếp các cuộn để phát triển một số cặp cực tùy ý ở mỗi pha. Bằng cách tăng số cực, roto của máy điện sẽ quay chậm hơn. Khi không có tải, roto của máy điện sẽ quay ở cùng một tốc độ giống nhau khi có từ trường chạy quanh được gọi là tốc độ đồng bộ. Nói chung, tốc độ đồng bộ là:

$$n = \frac{60f}{P/2} \quad (5.4.3)$$

Trong đó n là tốc độ đồng bộ đo bằng đơn vị rpm, f là tần số cung cấp điện một chiều tính bằng Hz và P là số cực.

Ví dụ, đăng thức trên đề cập tới bất cứ máy một chiều 2 cực nào được nối với mạng điện 60 Hz chạy với tốc độ 3600 rpm mà không có tải, một máy 4 cực sẽ chạy ở tốc độ 1800 rpm, một máy 6 cực chạy với tốc độ 1200 rpm.... Cần phải chú ý là phần lớn máy phát điện chạy bằng tuabin gió là máy 4 cực, vì vậy có tốc độ đồng bộ là 1800 rpm khi được kết nối với hệ thống điện 60 Hz. Trong hệ thống điện 50 Hz, những máy phát điện đó sẽ chạy với tốc độ 1500 rpm.

5.4.3 Các máy điện đồng bộ

5.4.3.1 Khái quát chung về các máy điện đồng bộ

Các máy điện đồng bộ được sử dụng như máy phát điện trong các nhà máy điện có quy mô lớn. Trong các ứng dụng tuabin gió, thỉnh thoảng chúng được sử dụng trong các tuabin kết nối với mạng lưới điện hoặc kết hợp với bộ chuyển năng lượng điện trong các tuabin gió có tốc độ khác nhau. (xem phần 5.5). Một loại máy đồng bộ sử dụng nam châm vĩnh cửu cũng được sử dụng trong một số tuabin gió độc lập. (xem hình 5.4.6). Trong trường hợp này, đầu ra được điều chỉnh thành dòng một chiều trước khi năng lượng được truyền tới tải đầu cuối. Cuối cùng, các máy đồng bộ có thể được sử dụng như một phương tiện để kiểm soát điện áp và nguồn công suất phản kháng trong các mạng xoay chiều độc lập. Trong trường hợp này, chúng được coi như là bộ ngưng đồng bộ.

Các dạng phổ biến nhất của máy điện đồng bộ bao gồm: (1) từ trường chạy quanh roto và (2) phần ứng điện tĩnh bao gồm các cuộn dây đôi. Từ trường chạy trên roto được tạo ra có tính điện từ bởi dòng điện xoay chiều (được xem như là sự kích từ). Dòng một chiều thường được cung cấp bởi máy phát điện xoay chiều được gắn vào trực truyền động của máy đồng bộ. Máy phát điện loại nhỏ được xem như là bộ kích từ bởi vì nó kích từ tới các miền. Bộ kích từ có từ trường tĩnh và đầu ra là trên roto của máy đồng bộ. Đầu ra của bộ kích từ được điều chỉnh trở thành dòng một chiều ở đúng trên roto và chạy trực tiếp vào các cuộn kích từ của máy đồng bộ. Thay vào đó, dòng từ có thể được chuyển tới roto của máy đồng bộ qua vành gop điện và chổi quét. Trong các trường hợp khác dòng từ trong roto của máy đồng bộ được điều khiển từ bên ngoài.

Một đặc điểm nữa về máy đồng bộ có thể đưa ra cách thức hoạt động của nó. Giả sử là có từ trường thứ hai ở trên roto. Hai từ trường này sẽ tạo ra từ trường là tổng của hai từ trường từ. Nếu roto đang quay với tốc độ đồng bộ thì sẽ không có chuyển động tương ứng giữa bất cứ từ trường quay. Nếu từ trường thẳng hàng

nhau thì sẽ không có một lực nào tác động vào chúng mà có thể thay đổi được sự sắp xếp thẳng hàng đó. Tiếp theo, giả sử từ trường của roto được thay bởi từ trường của statô sẽ tạo ra một lực và sau đó tạo ra lực momen xoắn điện mà có khuynh hướng làm từ trường xếp thẳng hàng. Nếu có một lực momen xoắn từ bên ngoài tác động vào roto, nó có thể cân bằng được momen xoắn. Sau đó tạo ra một góc không đổi giữa từ trường của statô và roto. Cũng có một góc không đổi giữa từ trường của roto và trường kết quả được xem như là góc cường độ và có ký hiệu là delta (δ). Ta có thể liên tưởng tới một cái lò xo, bởi vì các thứ khác là bằng nhau, góc cường độ tăng lên theo lực momen xoắn. Rất quan trọng để chú ý là cứ $\delta > 0$, máy là máy phát điện. Nếu momen đầu vào giảm, góc cường độ có thể âm và máy đóng vai trò là một động cơ. Nói về chi tiết những mối liên hệ này nằm ngoài phạm vi của bài này, tuy nhiên, không cần hiểu hoạt động của máy đồng bộ vì các mục đích xem xét ở đây. Sự phát triển hoàn thiện này được đưa ra trong hầu hết các bài nói về động cơ điện. Ví dụ, xem bài của Brown và Hamilton (1984) hoặc của Nasa và Unnewerl (1979).

5.4.3.2 Lý thuyết hoạt động của máy điện đồng bộ

Phần sau đây sẽ đưa ra quan điểm tổng quát về hoạt động của máy đồng bộ dựa vào mạch tương ứng mà có thể được xuất phát từ nó và 2 góc điện. Sau đó là hệ số góc năng lượng, Φ , và góc cường độ, δ

Mạch điện ở trong các cuộn từ của máy đồng bộ I_1 sinh ra dòng từ trường. Dòng Φ phụ thuộc vào nguyên liệu và số vòng trong cuộn dây được giải thích trong phần 5.2.3, trong phần tính toán đầu tiên thì dòng tỷ lệ với dòng điện

$$\Phi = k_1 I_f \quad (5.4.4)$$

Trong đó k_1 là hệ số tỷ lệ không đổi. Điện áp được sinh ra trong phần ứng điện tĩnh, E , tỷ lệ với: (1) dòng từ trường và (2) tốc độ quay, n :

$$E = k_2 n \Phi \quad (5.4.5)$$

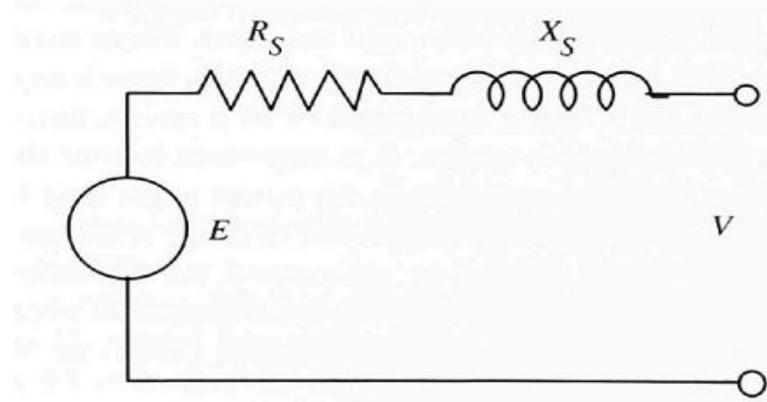
Trong đó k_2 là hệ số tỷ lệ khác. Điện áp này làm cho dòng đi qua các cuộn dây trong phần ứng điện.

Cuộn dây phần ứng điện của máy phát điện là một cuộn cảm ứng điện có thể được sinh ra bởi một điện kháng, được gọi là điện kháng đồng bộ, X_2 , và một trở kháng nhỏ, R_2 . Điện kháng có một giá trị không đổi khi tốc độ quay (và tần số lưới) là không đổi. Nhắc lại: $X_2 = 2\pi f L$ trong đó L là cảm kháng. Trở kháng đồng bộ là :

$$\hat{Z}_s = R_s + jX_s \quad (5.4.6)$$

Điện trở thường được so sánh với điện kháng vì vậy trở kháng thường xấp xỉ với điện kháng.

Một mạch tương ứng có thể được phát triển để tạo điều kiện cho việc phân tích hoạt động của máy. Mạch tương ứng này của máy đồng bộ được thể hiện trong hình 5.15. Để kết thúc, điện trở, R_3 , được tính đến mặc dù nó thường bị lờ đi trong quá trình phân tích.



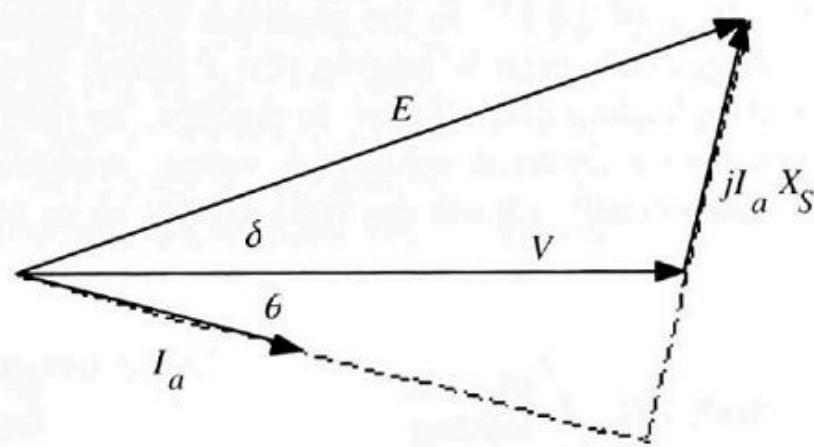
Hình 5.15: Mạch tương ứng của máy điện đồng bộ; E , điện áp được sinh ra trong phần ứng điện tĩnh, R_s , điện trở; V , điện áp cực; X_s trở kháng đồng bộ.

Mạch tương ứng có thể được sử dụng để phát triển mối liên hệ với pha như được thể hiện trong hình 5.16 và 5.17. Những số liệu này minh họa mối liên hệ với pha giữa điện áp nhiễm từ (E), điện áp cực (V) và dòng phần ứng điện I_2 trong máy đồng bộ với hệ số công suất trễ hay dẫn đầu. Những số liệu này được xuất phát từ giả thiết là điện áp cực với góc bằng 0. Với hệ số công suất và công suất đã biết (độ trễ hay dẫn đầu), độ lớn và góc quay của dòng có thể xác định được. Sử dụng mạch tương ứng, độ lớn và góc của điện áp từ trường có thể được xác định. Đẳng thức sau tương ứng với mạch tương ứng, bỏ qua điện trở :

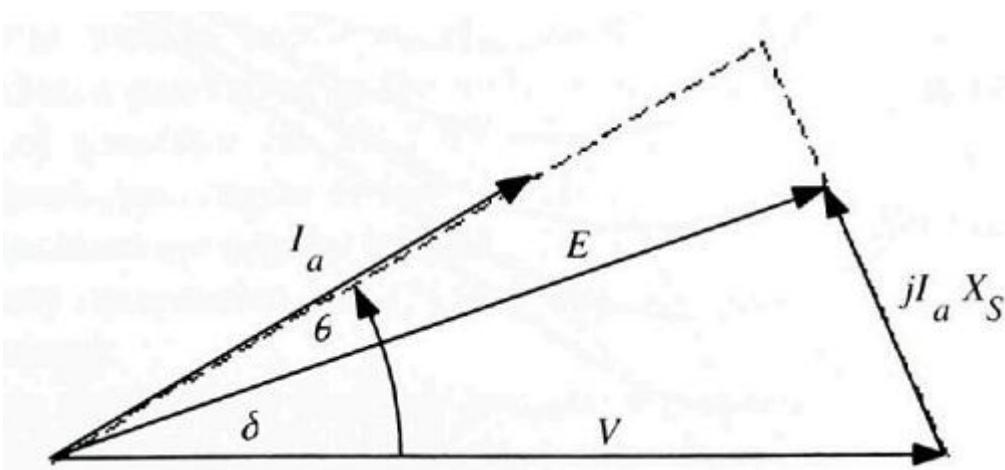
$$\hat{E} = \hat{V} + jX_s \hat{I}_a \quad (5.4.7)$$

Góc cường độ, δ , được biểu diễn trong hình 5.16 và 5.17, theo định nghĩa là góc giữa điện áp từ và điện áp cực. Như được miêu tả ở trên, nó là góc giữa roto và trường kết quả

Cần phải chú ý những điều sau: (1) dòng phần ứng điện trong hình 5.16 có điện áp đang trễ, chỉ ra hệ số công suất độ trễ, (2) dòng trong phần ứng điện trong hình 5.17 đang dẫn điện áp, chỉ ra hệ số dẫn đầu và (3) điện áp nhiễm từ điều khiển điện áp cực, tạo ra một góc công suất dương khi máy đang trong trạng thái phát điện



Hình 5.16: Sơ đồ pha của máy phát điện đồng bộ, hệ số công suất trễ; E , điện áp nhiễm từ, I_a , dòng phần ứng điện; j , $\sqrt{-1}$; V , điện áp cực; X_s , trở kháng đồng bộ; δ , góc công suất; θ , góc hệ số công suất.



Hình 5.17: Sơ đồ biểu diễn đa pha của máy phát điện đồng bộ, hệ số công suất chủ yếu; E , điện áp nhiễm từ; I_a , dòng phản ứng điện; $j\sqrt{-1}$; V , điện áp cực; X_s , trở kháng đồng bộ; δ , góc công suất, G , góc hệ số công suất

Bằng cách biểu diễn đa pha cùng với hình vẽ tham khảo 5.16 và 5.17 như được giải thích trong phần 5.2.3, có thể xác định được công suất thực P như sau:

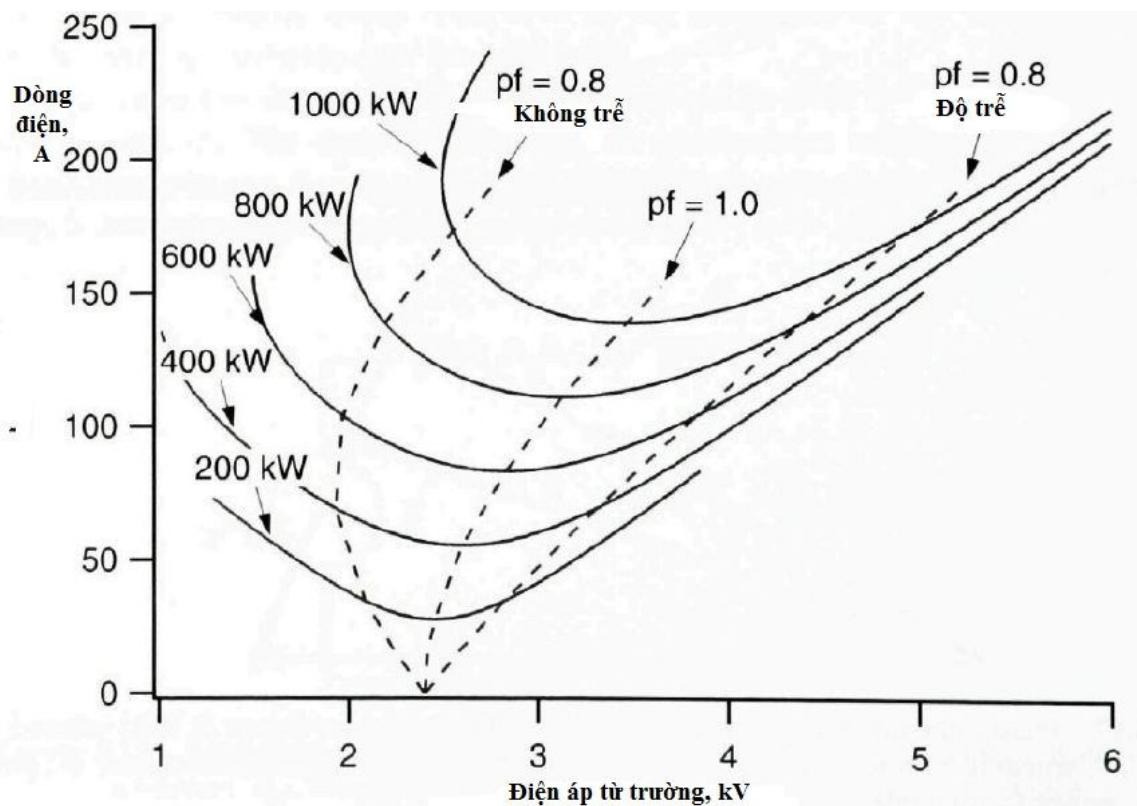
$$P = \frac{\hat{E} \hat{V}}{X_s} \sin(\delta) \quad (5.4.8)$$

Tương tự, công suất vô công Q , là :

$$Q = \frac{\hat{E} \hat{V} \cos(\delta) - \hat{V}^2}{X_s} \quad (5.4.9)$$

Cần phải nhấn mạnh rằng, trong ứng dụng kết nối với mạng điện với điện áp cực là không đổi (được điều khiển bởi máy phát điện khác), một máy điện đồng bộ có thể đóng vai trò như một nguồn công suất phản kháng mà được cung cấp bởi các tải của hệ thống. Thay đổi dòng điện sẽ làm thay đổi điện áp kính từ, E , trong đó công suất là không đổi. Cho bất cứ giá trị công suất nào, một bản vẽ về dòng phản ứng điện với dòng kính từ sẽ có hệ số công suất thống nhất tối thiểu. Một ví dụ về điều này là trong hình 5.18. Ví dụ này là của máy phát điện có một mức điện áp trung bình 2,4 kV. Trong cách thức là máy phát điện dòng từ trường cao hơn (do vậy điện áp từ trường cao hơn) sẽ sinh ra một hệ số công suất trễ, từ trường thấp hơn (điện áp từ trường thấp hơn) dòng sẽ gây ra hệ số công suất chính. Trên thực tế, dòng kính từ nói chung được sử dụng để đo điện áp cực của máy phát điện. Một bộ đo điện áp được nối với máy phát điện để tự động điều chỉnh dòng kính từ để giữ điện áp cực không đổi.

Chúng ta xem xét thêm các chi tiết của các cuộn của máy đồng bộ. Phần lớn máy phát điện đồng bộ có các cực lồi mặc dù có một vài rotor hình tròn. Thuật ngữ trực thẳng đứng và trực vuông góc được kết hợp trong các máy có cực lồi. Những thuật ngữ này được thảo luận chi tiết trong các bài viết về máy điện chư bài của Brown và Hamilton (1984).



Hình 5.18: Dòng phản ứng điện máy đồng bộ và dòng kích từ

5.4.3.3 Khởi động các máy điện đồng bộ

Các máy đồng bộ không tự khởi động được từ bên trong. Trong một số ứng dụng, máy này được tăng tốc độ bởi một động cơ khởi động chính ở bên ngoài và sau đó được đồng bộ khitới mạng điện. Trong một số ứng dụng khác, cần yêu cầu khả năng tự khởi động. Trong trường hợp này, roto được gắn với các thanh chống rung. Các thanh này cho phép máy khởi động giống như hoạt động của máy điện cảm ứng (sẽ được miêu tả trong phần sau). Trong suốt quá trình hoạt động, các thanh chống rung cũng làm giảm dao động trong bộ phận roto của máy.

Không kể tới máy điện đồng bộ được giatốc hoạt động như thế nào, ở đây quan tâm tới việc máy phát điện được đồng bộ với mạng lưới điện mà nó được kết nối như thế nào. Yêu cầu phải có một sự phối hợp rất chính xác giữa vị trí góc của roto và góc điện của công suất dòng xoay chiều tại ngay thời điểm phối hợp. Trong lịch sử, sự đồng bộ được tạo ra bằng tay với sự trợ giúp của những đèn flash, nhưng ngày nay nó được tạo ra nhờ điều khiển bằng điện.

Tuabin gió kết hợp với máy phát điện đồng bộ thường được khởi động bởi gió (không giống như rất nhiều tuabin kết hợp với máy phát điện cảm ứng có thể được điều khiển tốc độ). Khi tuabin được nối với mạng điện một chiều mà đã được cung cấp năng lượng, điều khiển tốc Độ linh hoạt có thể rất cần như một phần của quá trình đồng bộ. Trong một số lưới điện độc lập, công suất một chiều được cung cấp bởi máy phát điện đồng bộ lên máy phát điện chạy bằng diesel hoặc tuabin gió nhưng không phải cả hai. Điều này làm rõ nhu cầu cần phải có máy phát điện đồng bộ.

5.4.4 Các máy điện cảm ứng

5.4.4.1 Khái quát chung về các máy điện cảm ứng

Các máy điện cảm ứng (thường được coi như là các máy điện không đồng bộ) thường được sử dụng cho động cơ trong hầu hết các ứng dụng thương mại và công nghiệp. Từ lâu người ta đã biết đến các máy điện cảm ứng có thể được sử dụng như máy phát điện nhưng chúng ít được ứng dụng theo cách đó cho mãi tới khi phát minh về máy phát điện được công bố giữa những năm 1970. Ngày nay, các máy điện cảm ứng trở thành loại phổ biến nhất của máy phát điện sử dụng tuabin gió và đồng thời được sử dụng cho sự phân phối điện khác (thủy điện, điều khiển bằng động cơ).

Các máy điện cảm ứng rất phổ biến vì (1) chúng đơn giản, cấu tạo giao nhau; (2) giả cả của chúng tương đối hợp lý và (3) chúng có thể được nối và không nối từ lối điện tương đối đơn giản.

Stato trong máy điện cảm ứng bao gồm các cuộn đôi, giống với máy đồng bộ.Roto trong máy điện cảm ứng phổ biến nhất không có các cuộn. Hơn nữa, chúng có các thanh dẫn điện được gắn với lõi được dát mỏng và rắn. Các thanh này làm cho roto giống như một cái lồng sóc. Vì lý do này, các máy của loại này thường được gọi là các máy lồng sóc.

Một số máy điện cảm ứng không có các cuộn trên roto. Những máy này được biết đến như là các máy roto cuộn cảm ứng. Các máy này đôi lúc được sử dụng với các tuabin gió có tốc độ khác nhau. Chúng đắt hơn và ít giao nhau hơn là những máy có roto giống như lồng sóc.Việc phụ thuộc vào các máy roto cuộn cảm ứng được dùng như thế nào chúng cũng có nghĩa là hao phí công suất tăng lên gấp đôi. Điều này là do công suất có thể được chuyển tới hoặc lấy đi từ roto đồng thời từ stato.

Các máy cảm ứng cần nguồn công suất phản kháng từ bên ngoài.Chúng cũng cần một nguồn tần số không đổi từ bên ngoài để điều khiển tốc độ quay. Vì những lí do này chúng phần lớn được nối với mạng điện lớn hơn. Trong những mạng này, các máy phát điện đồng bộ được nối với động cơ chính với bộ điều khiển tốc độ tạo ra tần số lướt và cung cấp công suất phản kháng được yêu cầu.

Khi hoạt động như máy phát điện, máy điện cảm ứng có thể được nối với mạng điện và tăng tốc độ như một động cơ hoặc nó có thể được tăng tốc với động cơ chính và sau đó được nối với mạng. Đây là những vấn đề có thể được xem xét trong các trường hợp khác. Một vài trường hợp được bàn bạc trong phần dưới đây.

Các máy điện cảm ứng thường hoạt động ở hệ số công suất thấp. Để nâng cao hệ số công suất, một bộ tụ điện thường xuyên được nối với máy này hoặc gần điểm nối của mạng điện. Cần phải xem xét về việc đặt kích thước cho bộ tụ điện khi máy này hoạt động như một máy phát điện. Nói cụ thể là nó sẽ không thể tự kích từ cho máy phát điện nếu việc kết nối tới lối điện bị thất thoát do có lỗi.

Các máy điện cảm ứng có thể được sử dụng như máy phát điện trong các mạng điện nhỏ hoặc thậm chí trong các ứng dụng riêng lẻ. Trong những trường hợp này, các phương pháp đặc biệt phải được đưa ra để chúng hoạt động một cách chính xác. Các phương pháp này liên quan tới việc cung cấp công suất phản kháng, giữ độ ổn định của tần số và gia tốc máy tĩnh tới tốc độ hoạt động. Một trong những phương pháp này được miêu tả trong chương 8.

5.4.4.2 Lý thuyết về hoạt động của máy điện cảm ứng

Lý thuyết về hoạt động của máy điện cảm ứng lồng sóc có thể được tóm tắt như sau:

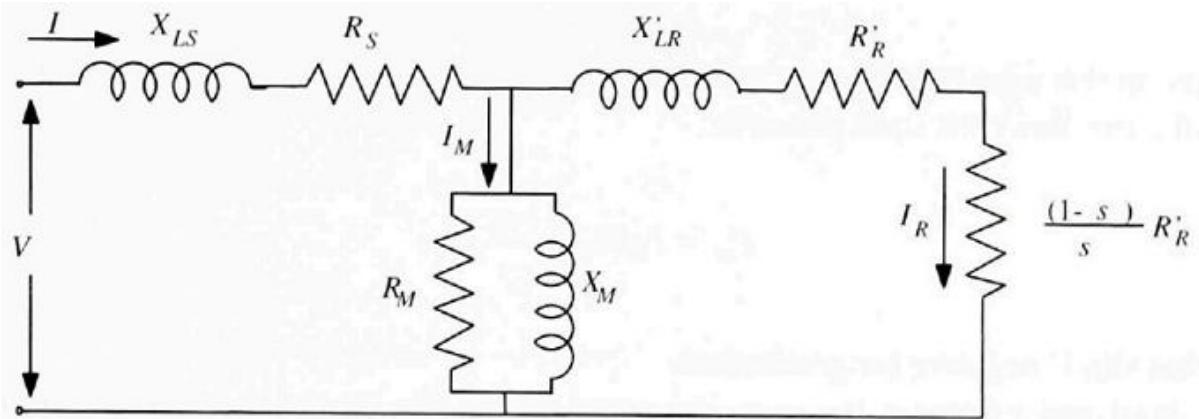
- Các cuộn của Stato được sắp xếp sao cho pha thay thế dòng sinh ra một từ trường quay trong stato (sẽ được giải thích trong phần 5.4.2).
- Từ trường quay quay với tốc độ đồng bộ chính xác (ví dụ 1800 rpm cho máy phát điện 4 cực trong mạng điện 60 Hz).
- Roto quay với tốc độ hơi khác so với tốc độ đồng bộ (nhằm để có chuyển động tương đối giữa roto và các từ trường trong roto).
- Từ trường quay cảm ứng dòng và do đó có một từ trường trong roto do sự khác nhau về tốc độ của roto và từ trường.
- Sự tương tác của từ trường của roto và từ trường của stato sẽ gây ra tăng điện áp ở các cực (trong cách thức là máy phát điện) và có dòng chảy qua từ máy.

Một thông số của vấn đề quan trọng cụ thể này trong khi miêu tả các máy điện cảm ứng là hệ số trượt. Hệ số trượt là tỷ lệ khác nhau giữa tốc độ đồng bộ n_s , và tốc độ hoạt động của roto n_1 và tốc độ đồng bộ là :

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5.4.10)$$

Khi hệ số trượt dương, máy này giống như là một động cơ, khi hệ số đó âm thì máy này có vai trò như một cái máy phát điện. Hệ số trượt thường được tính bằng %. Giá trị điển hình của hệ số ở điều kiện được tính toán là 2 %.

Phần lớn các đặc điểm của các yếu tố liên quan có thể được miêu tả trong mạch tương ứng như trong hình 5.19. Mạch tương ứng và mối quan hệ đi kèm theo nó có trong hầu hết các bài về máy điện. Chúng sẽ được đưa ra nhưng không phải ở đây:



Hình 5.19: Mạch tương ứng của máy cảm ứng, chú giải xem ở trong bài

Ở đây V là điện áp cực, I là dòng của stator, I_M là dòng từ tính hóa, I_R là dòng rôto, X_{LS} điện kháng bị rò rỉ trong stator, R_S là điện trở của stator (đề cập tới rôto), X'_{LR} là điện kháng bị rò rỉ trong rôto, R'_R là điện trở của rôto (đề cập tới stator), X_M là điện trở từ tính hóa và R_M là điện trở mắc song song với điện kháng.

Một số điểm cần chú ý :

- X_M luôn luôn lớn hơn X_{LS} và X'_{LR}
- Giá trị $\frac{1-s}{s} R'_R$ thực sự là điện trở khác nhau. Đối với động cơ là dương thì máy phát điện là âm.
- R_M là điện trở lớn và thường được bỏ qua

Giá trị của điện trở khác nhau và điện kháng có thể có trong các bài kiểm tra. Các bài kiểm tra bao gồm:

- Bài kiểm tra về rôto bị đóng (dòng, điện áp và công suất được đo ở điện áp giảm và dòng tỷ lệ xấp xỉ).
- Các bài kiểm tra về điện áp và dòng khi không có tải (dòng, công suất được đo khi không có tải).
- Các bài kiểm tra cơ khí để định lượng tổn hao do quạt gió và tổn hao do ma sát (được miêu tả ở dưới đây).

Không phải tất cả công suất được chuyển trong máy điện cảm ứng là công suất có ích. Những công suất này là một vài tổn hao. Tổn hao chính là (i) tổn hao cơ học do chạy quạt gió và ma sát, (ii) tổn hao từ và điện trở trong rôto và (iii) là tổn hao từ và điện trở trong stator. Sự tổn hao do quạt gió là những tổn hao do lực cản lên rôto do cọ xát với không khí. Tổn hao do cọ xát là tổn hao chính trong các vòng bi. Bạn có thể tìm thêm thông tin về tổn hao trong các bài viết về máy điện (xem của Brown và Hamilton, 1984)

Trong cách thức là máy phát điện, đầu vào công suất cơ học của máy là P_m . Đầu vào công suất này dùng để sản xuất điện bị giảm do những tổn hao về cơ học, $P_{mechloss}$. Công suất cơ học có sẵn được đảo tại rôto của máy phát điện, P_m là:

$$P_m = -(P_m - P_{mechloss}) \quad (5.4.11)$$

(Chú ý: dấu (-) phải phù hợp với quy ước về công suất được sinh ra là âm). Trong các số hạng điện công suất đảo là :

$$P_m = I_R^2 R'_R \frac{1-s}{s} \quad (5.4.12)$$

Nhắc lại là hệ số trượt phải là âm khi phát điện

Những tổn hao từ và điện trong roto làm giảm công suất mà có thể được truyền từ roto sang lõi khí tới stato. Công suất được truyền P_R là:

$$P_g = I_R^2 R'_R \frac{1-s}{s} + I_R^2 R'_R \quad (5.4.13)$$

(Chú ý: $I_R^2 R'_R$ là tổn hao công suất điện trong roto làm cho P_K ít âm hơn P_M)

Vì vậy:

$$P_g = \frac{P_m}{1-s} \quad (5.4.14)$$

Tổn hao công suất trong stato là:

$$P_{loss} = I_R^2 R_S \quad (5.4.15)$$

Công suất được sinh ra ở các cực của máy phát điện, P_w là

$$P_{out} = P_g + P_{loss} \quad (5.4.16)$$

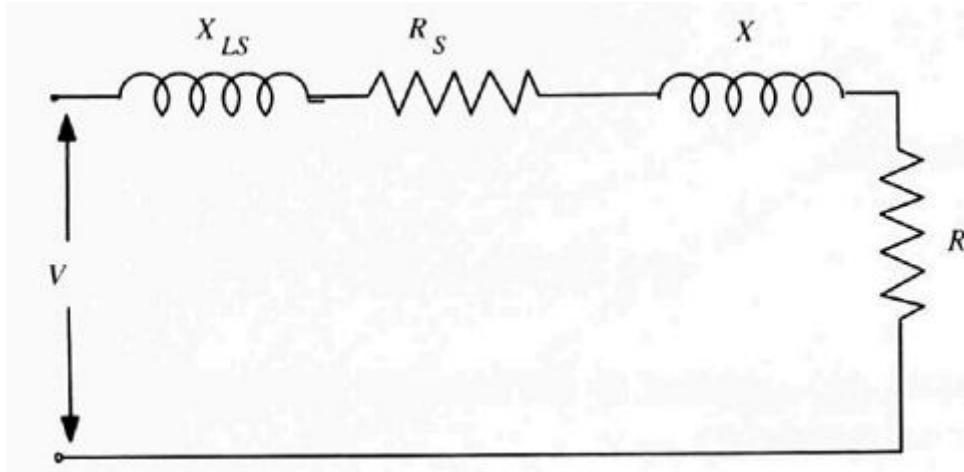
Toàn bộ hiệu suất (trong cách thức máy phát điện) η_{gen} là

$$\eta_{gen} = -\frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5.4.17)$$

Hệ số công suất, PF , (hệ số công suất đang trễ trong suốt quá trình giám sát và dẫn đầu trong suốt quá trình phát điện), là tỷ lệ của công suất thực với công suất biểu kiến

$$PF = -\frac{P_{out}}{VI} \quad (5.4.18)$$

Các công thức trên đây chỉ ra mối quan hệ giữa công suất thực tế, công suất phản kháng và các dòng, nhưng vẫn chưa được tính toán hoàn thiện theo các thông số của máy. Điều này có thể được làm một cách thuận lợi bằng cách đầu tiên đơn giản hóa mạch tương ứng trong hình 5.19 như được trình bày trong hình 5.20.



Hình 5.20: Mạch tương ứng của máy cảm ứng; R , điện trở; X_{LS} , điện kháng bị rò rỉ ở stator; R_S điện trở của stator; X , điện kháng; V , điện áp cực

Nếu các thông số trong mạch tương ứng đã biết, sau đó điện trở R và điện kháng X trong mô hình đơn giản có thể như sau. Từ hình 5.19, bỏ qua R_M và sử dụng đẳng thức 5.2.21 và 5.2.22 để chỉ ra trở kháng song song và nối tiếp, chúng ta có:

$$R + jX = jX_M \left(jX'_{LR} + \frac{R'_R}{s} \right) \bigg/ \left[\frac{R'_R}{s} + j(X_M + X'_{LR}) \right] \quad (5.4.19)$$

Và điện trở R là:

$$R = X_M^2 \frac{R'_R}{s} \bigg/ \left[\left(\frac{R'_R}{s} \right)^2 + (X_M + X'_{LR})^2 \right] \quad (5.4.20)$$

Sau đó điện kháng X là:

$$R = X_M \left(\frac{R'_R}{s} \right)^2 + X'_{LR} (X_M + X'_{LR}) \bigg/ \left[\left(\frac{R'_R}{s} \right)^2 + (X_M + X'_{LR})^2 \right] \quad (5.4.21)$$

Công suất được đảo trong R sẽ bằng $I_s^2 R$ trong đó I_s là dòng (một pha) trong cuộn

Tổng trở kháng là:

$$\hat{Z} = (R + R_s) + j(X + X_{LS}) \quad (5.4.22)$$

Dòng pha là:

$$\hat{I}_s = \hat{V} / \hat{Z} \quad (5.4.23)$$

Công suất cơ học được đảo ở mỗi pha là :

$$P_m = (1-s) I_s^2 R \quad (5.4.24)$$

Công suất thực sinh ra ở mỗi pha là:

$$P_{out} = I_s^2 (R_s + R) \quad (5.4.25)$$

Tổng công suất phản kháng là:

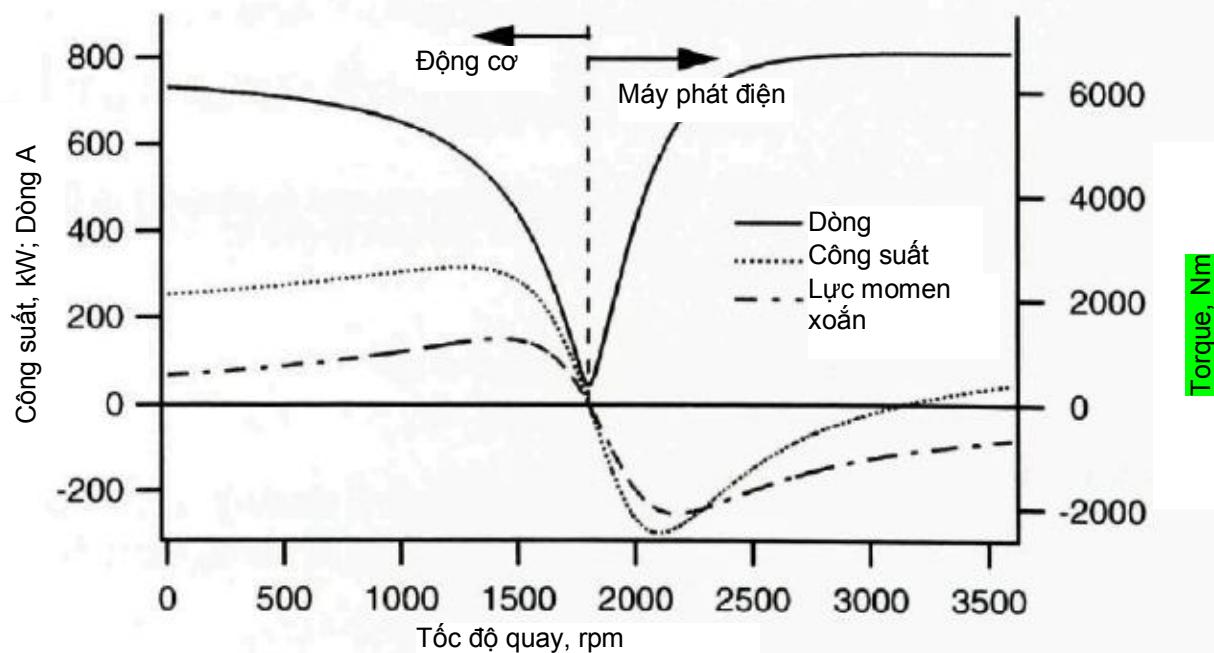
$$Q = I_s^2 (X_{LS} + X) \quad (5.4.26)$$

Lực Momen xoắn cơ học, Q_m được áp dụng cho máy này (như là một máy phát điện) là công suất đầu vào được chia ra bởi tốc độ quay:

$$Q_m = P_{in} / n \quad (5.4.27)$$

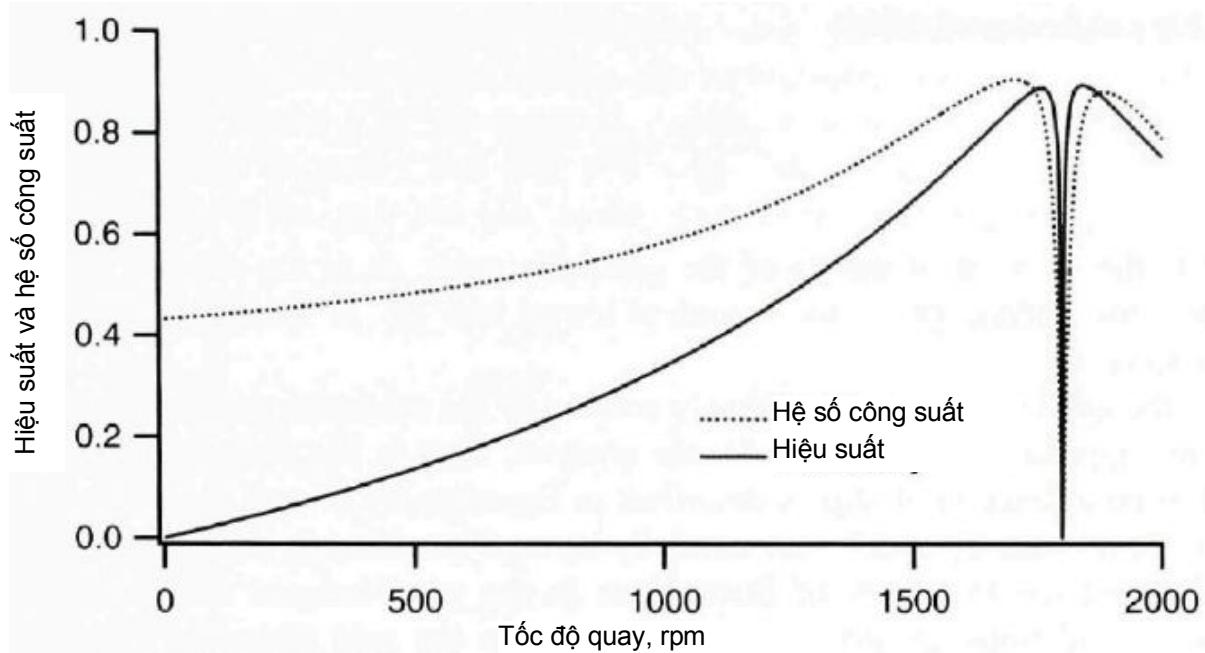
Chú ý là trong chương này Q không có chỉ số dưới dòng với công suất phản kháng. Q với chỉ số dưới dòng được sử dụng cho lực momen xoắn để phù hợp với các chương khác và danh mục cơ khí thông thường. Lực momen xoắn cơ học xấp xỉ gần bằng với hệ số trượt trên dải của hệ số trượt mà nói chung thường được áp dụng trong thực tế.

Hình 5.21 và 5.22 mô tả kết quả áp dụng mạch tương ứng để tìm ra tính chất của máy cảm ứng 3 pha. Hình 5.21 chỉ ra công suất, dòng và lực momen xoắn tại các tốc độ từ 0 tới tốc độ đồng bộ gấp đôi. Giữa điểm dừng và điểm 1800 rpm, máy này đang chạy, ở trên là đang phát. Khi một máy phát điện trong tuabin gió, máy sẽ không bao giờ hoạt động trên mức xấp xỉ bằng 3 % trên tốc độ đồng bộ, nhưng nó sẽ hoạt động với tốc độ dưới 1800 trong khi đang khởi động. Chú ý là dòng đạt giá trị cực đại trong quá trình khởi động là hơn 730 A, lớn hơn gấp 5 lần giá trị ước tính là 140 A. Lực momen xoắn cực đại là gấp khoảng 2-3 lần giá trị ước tính (504 Nm). Lực Momen xoắn khởi động ở tốc độ bằng 0 xấp xỉ bằng với giá trị được đo lúc ngừng. Công suất đạt cực đại gấp khoảng 3 lần giá trị được đo (100 kW).



Hình 5.21: Công suất, dòng và lực momen xoắn của máy điện cảm ứng

Hình 5.22 chỉ ra hiệu suất hoạt động và hệ số công suất từ lúc khởi động cho tới lúc đạt tốc độ 2000 rpm. Máy này có hiệu suất hoạt động và hệ số công suất giống nhau trong suốt quá trình hoạt động bình thường khi phát điện nhưng cả hai đều giảm tới 0 khi không có tải.



Hình 5.22: Hiệu suất và hệ số công suất của máy cảm ứng

5.4.4.3 Khởi động tuabin gió với máy phát điện cảm ứng

Có hai phương pháp cơ bản khởi động tuabin gió bằng máy phát điện cảm ứng

- Sử dụng roto tuabin gió để gia tốc tới tốc độ hoạt động và sau đó liên kết máy phát điện với lưới.
- Nối máy phát điện tới lưới điện và sử dụng nó như một động cơ để đẩy roto của tuabin gió tăng tốc.

Khi phương pháp đầu tiên được áp dụng, roto tuabin gió chắc chắn sẽ tự khởi động được. Phương pháp này rất phổ biến với các tuabin gió được điều khiển ăn khớp mà có thể tự khởi động. Cần phải giám sát tốc độ máy phát điện để có thể được nối khi tốc độ gần với tốc độ đồng bộ đến mức có thể.

Phương pháp thứ hai thường được sử dụng với các tuabin gió được điều khiển chậm. Trong trường hợp này, hệ thống điều khiển phải giám sát tốc độ gió và quyết định xem khi nào gió nằm trong dải phù hợp để chạy tuabin. Sau đó, máy phát điện được kết nối trực tiếp qua đường dây tới lưới điện và nó sẽ đóng vai trò là động cơ. Tuy nhiên, trên thực tế, đi qua các đường dây không phải là phương pháp khởi động lý tưởng. Sẽ thích hợp hơn để sử dụng một số phương pháp giảm điện áp và giới hạn dòng trong suốt quá trình khởi động. Điều này sẽ được thể hiện trong phần 5.6.3 dưới đây. Khi tốc độ của roto tuabin gió tăng, khí động học trở nên thích hợp hơn. Lực momen xoắn từ gió sẽ đẩy roto máy phát điện chạy với tốc độ khá lớn so với tốc độ đồng bộ như được xác định bởi mối quan hệ giữa lực momen xoắn và hệ số trượt và được miêu tả ở phần 5.4.4.2.

5.4.4.4 Phân tích động lực học về máy điện cảm ứng

Khi lực momen xoắn được áp dụng trong roto của một máy điện cảm ứng, nó sẽ hoạt động với một hệ số trượt nhất định. Nếu lực momen xoắn được áp dụng này biến thiên, tốc độ của roto đồng thời sẽ biến thiên. Mối quan hệ này được miêu tả bởi công thức sau:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = Q_e - Q_r \quad (5.4.28)$$

Trong đó J là lực quán tính của roto máy phát điện, ω_t là tốc độ của góc của roto máy phát điện (rad/s), Q_t là lực momen xoắn và Q_r là lực momen xoắn được áp dụng cho roto của máy phát điện.

Khi được lực momen xoắn áp dụng biến thiên tương đối chậm tương ứng với tần số lưới điện kết quả trạng thái tương đối ổn định được dùng để phục vụ cho việc phân tích. Chính lực momen xoắn được

giả thiết đóng vai trò như là hệ số trượt như được miêu tả trong đẳng thức 5.4.27 và đẳng thức trước đó. Kết quả trạng thái ổn định này có thể được dùng để đánh giá động lực học của tuabin gió. Điều này là vì tần số của sự biến thiên của lực momen xoắn và sự dao động cơ học nói chung lớn hơn tần số lướt điện. Phương trình của máy phát điện cảm ứng được sử dụng theo cách này được áp dụng, ví dụ, trong kiểu tàu điều khiển bởi tuabin gió động lực học, DrvTrnVB. Điều này được miêu tả trong Manwell (1996).

Cần chú ý là các máy không đồng bộ (máy điện cảm ứng) nhẹ hơn trong tương tác động lực học để thay đổi các điều kiện hơn là các máy đồng bộ. Điều này là do các máy không đồng bộ đặt dưới một sự thay đổi nhỏ về tốc độ nhưng lại rất điển hình khi lực momen xoắn tham gia hay không tham gia vào sự thay đổi đó. Các máy đồng bộ như được đề cập ở trước hoạt động với tốc độ không đổi chỉ với sự thay đổi góc công suất khi lực momen xoắn biến thiên. Các máy điện đồng bộ có thể có rất ít tương tác cứng với các điều kiện biến đổi như thế.

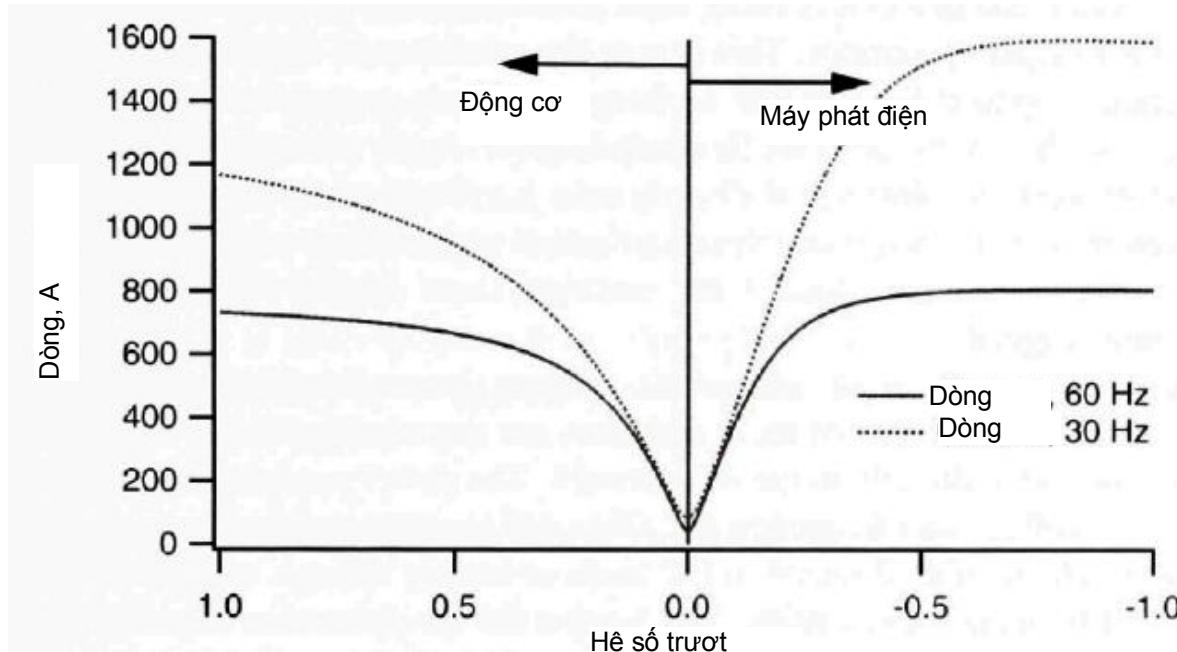
5.4.4.5 Hoạt động ngoài thiết kế của các máy điện cảm ứng

Các máy điện cảm ứng được thiết kế hoạt động ở một điểm hoạt động cụ thể. Điểm hoạt động này thường là công suất dự tính tại một tần số hay điện áp cụ thể. Trong các ứng dụng tuabin gió, có một số tình huống khi mà các máy này có thể chạy trong điều kiện ngoài dự tính. 4 điều kiện là:

- Khởi động (được đề cập ở trên)
- Hoạt động dưới một công suất được đo dưới đây
- Hoạt động tại các vận tốc khác nhau
- Hoạt động trong điều kiện xuất hiện sóng điều hòa

Công suất hoạt động được đo dưới đây nhưng tại cùng một tần số và điện áp là xảy ra rất thường xuyên. Nó thường tạo ra một số vấn đề. Tuy nhiên, cả hai hiệu suất và hệ số công suất thường thấp hơn dưới những điều kiện như vậy. Các trạng thái hoạt động dưới công suất được đo có thể được kiểm tra nhờ ứng dụng của mạch tương ứng của máy điện cảm ứng và các đẳng thức liên quan.

Có một số lợi ích từ việc chạy rotor tuabin gió ở các tốc độ khác nhau. Một tuabin gió với một máy phát điện cảm ứng có thể được chạy với các tốc độ khác nhau nếu bộ chuyển đổi năng lượng điện bao gồm trong hệ thống giữa máy phát điện và phần còn lại của mạng điện. Những bộ chuyển đổi đó hoạt động nhờ sự biến thiên tần số của nguồn cung dòng xoay chiều tại các cực của máy phát điện. Những bộ chuyển đổi biến thiên điện áp được dùng. Điều này là vì một máy điện cảm ứng hoạt động hiệu quả nhất khi tỷ lệ giữa tần số và điện áp (tỷ số giữa Volt và Hz) của nguồn cung là không đổi (hoặc gần không đổi). Khi tỷ lệ đó lệch so với giá trị thiết kế, một số vấn đề có thể này sinh. Ví dụ, dòng sẽ lớn hơn gây ra otổn hao lớn hơn và có thể làm hỏng các cuộn của máy phát điện. Ví dụ, Hình 5.23 so sánh dòng của máy điện cảm ứng hoạt động theo một tần số cho sẵn và một nửa giá trị đó, nhưng cả hai điện áp đều giống nhau. Máy trong trường hợp này là giống nhau được sử dụng trong ví dụ trước (Hình 5.21).



Hình 5.23: Dòng có các tần số khác nhau

Hoạt động trong điều kiện xuất hiện sóng điều hòa có thể xảy ra nếu có bộ chuyển đổi về kích thước lớn của bộ chuyển đổi công suất trong hệ thống tới các máy được kết nối. Điều này là trường hợp của tuabin gió có tốc độ khác nhau và có thể coi là trường hợp trong các mạng điện phân ly (Xem chương 8). Sóng điều hòa là điện áp và dòng xoay chiều mà có tần số gấp đôi tần số của lưới điện cơ bản. Nguồn của sóng điều hòa được thảo luận dưới đây trong hình 5.5.4. Sóng điều hòa có thể làm hỏng vòng bi và cách điện và có thể cản trở kiểm soát điện và các tín hiệu dữ liệu.

5.4.5 Máy phát điện một chiều

Một loại máy điện quan trọng trong lịch sử được dùng trong các ứng dụng tuabin gió là máy phát điện một chiều cuộn cảm ứng mắc song song. Máy này từng được sử dụng phổ biến trong các tuabin gió chạy bằng ác quy nhỏ hơn. Trong những máy phát điện này từ trường nằm trên stator và phần ứng điện nằm trong phần rotor. Từ trường điện được sinh ra do dòng điện đi qua các cuộn dây từ xếp song song với các cuộn dây của phần ứng điện. Một ống góp nằm trong rotor có tác dụng điều chỉnh công suất được sinh ra thành dòng một chiều. Dòng được sinh ra sẽ đi qua ống góp và chổi quét.

Trong những máy phát điện này, dòng từ trường, và sau đó từ trường (tại một điểm) tăng lên tới tốc độ hoạt động. Điện áp tại phần ứng điện và lực momen xoắn điện cũng tăng theo vận tốc.

Vận tốc cuối cùng của tuabin được xác định bởi sự cân bằng giữa lực momen xoắn từ rotor tuabin và lực momen xoắn điện.

Các máy phát điện dòng một chiều của loại này ít khi được sử dụng ngày nay vì chi phí cao và yêu cầu bảo dưỡng cao. Các máy phát điện ra sau được kết hợp với các chổi quét. Nhiều thông tin chi tiết về máy phát điện của loại này có thể tìm thấy trong bài của Johnson (1985)

5.4.6 Các máy phát điện nam châm vĩnh cửu

Một loại máy điện mà đang được sử dụng thường xuyên hơn trong các ứng dụng của tuabin gió là máy phát điện nam châm vĩnh cửu. Ngày nay, đây là lựa chọn máy phát điện trong hầu hết các máy phát điện tuabin gió nhỏ, lên tới ít nhất 10 kW. Trong những máy phát điện này, các nam châm vĩnh cửu cung cấp từ trường, vì vậy không cần các cuộn từ hay nguồn cung cấp dòng điện cho từ trường. Trong một ví dụ, nam châm được tích hợp trực tiếp vào trong rotor đúc bằng nhôm hình trụ. Công suất được sinh ra từ phần ứng điện tĩnh, vì vậy không cần phải có ống góp, vành góp điện hoặc chổi quét. Bởi vì cấu tạo của máy là rất đơn giản, máy phát điện nam châm này hoàn toàn phù hợp.

Nguyên lý hoạt động của các máy phát điện nam châm vĩnh cửu giống với máy phát điện của các máy đồng bộ trừ những máy chạy có vẻ như là đồng bộ. Đó là chúng không được kết nối trực tiếp tới mạng xoay chiều. Công suất được sinh ra do máy phát điện là dòng xoay chiều có điện áp và tần số khác nhau. Dòng xoay chiều này thường được điều chỉnh ngay lập tức thành dòng một chiều. Cường độ của dòng một chiều hoặc là được chuyển tới các tải của dòng một chiều hoặc là lưu trữ trong ác quy hoặc nó được chuyển sang dòng xoay chiều có điện áp và tần số cố định. Xem phần 5.5 để tham khảo về chuyển đổi năng lượng. Phát triển máy phát điện nam châm vĩnh cửu để phục vụ cho các ứng dụng tuabin gió được miêu tả bởi Fuchs (1992)

5.4.7 Các loại máy điện khác

Có ít nhất 2 loại máy phát điện khác mà có thể xem xét để phục vụ cho tuabin gió : (i) các máy phát điện điều khiển trực tiếp và (ii) các máy phát điện có từ trờ khác nhau.

Các máy phát điện điều khiển trực tiếp là các máy đồng bộ có thiết kế đặc biệt. Điểm khác nhau chính so với các máy chuẩn là chúng được tạo nên bởi một số cực mà rotor máy phát điện có thể quay ở tốc độ giống nhau như rotor của tuabin gió. Điều này giúp không cần hộp truyền động. Bởi vì có rất nhiều cực nên đường kính của máy phát điện là tương đối lớn. Các máy phát điện điều khiển trực tiếp trên tuabin gió thường được sử dụng liên kết với bộ chuyển đổi năng lượng điện. Điều này làm mất thời gian trong các yêu cầu về tần số và điện áp của chính máy phát điện.

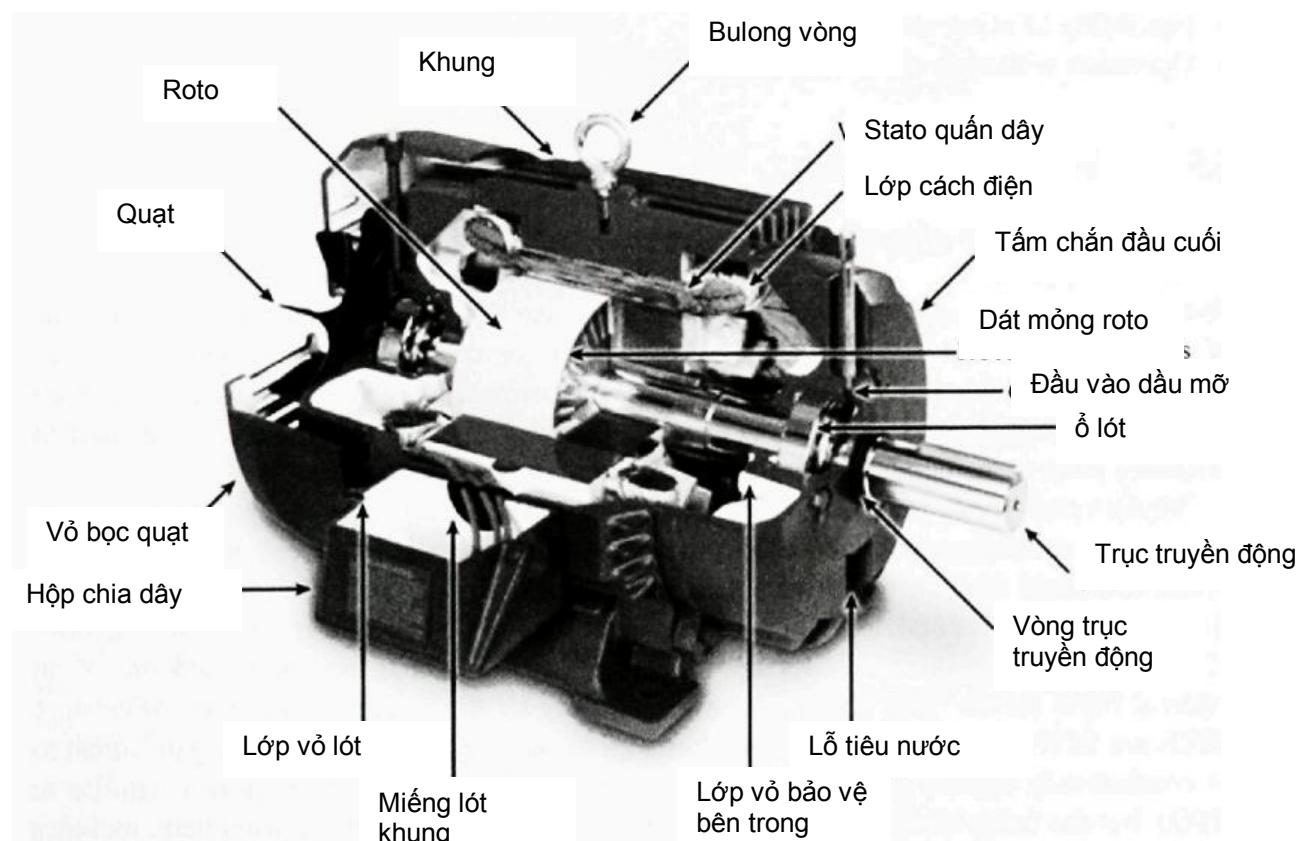
Các máy phát điện từ trờ khác nhau có một roto nối với các cực riêng biệt với nhau (không có các cuộn) như trong hình 5.9. Khi roto quay, từ trờ của mạch nam châm nối với sự thay đổi của stato và roto. Từ trờ thay đổi này làm biến thiên từ trường kết quả và từ hóa các dòng trong phần ứng điện. Máy phát điện từ trờ khác nhau cần ít bảo dưỡng vì cấu tạo đơn giản của chúng. Hiện nay, không có các máy phát điện khác nhau được sử dụng trong tuabin gió thương mại nhưng nghiên cứu về điều đó đang được tiến hành. Xem các bài viết của Torrey và những đứa con (1993) sẽ chỉ ra một số nghiên cứu đó.

5.4.8 Thiết kế cơ học máy phát điện

Có một số vấn đề cần xem xét, trong đó phải kể tới thiết kế cơ học của máy phát điện. Trục khuỷu của roto và vòng bi chính được thiết kế theo nguyên lý cơ bản mà sẽ được thảo luận trong chương 6. Cấu tạo của stato của máy phát điện thường làm bằng thép. Thiết kế máy phát điện để kinh doanh phải đạt kích thước khung chuẩn. Các cuộn của phần ứng điện (và từ trường khi được ứng dụng) là dây bằng đồng. Dây này không chỉ được cách điện mà sự cách điện còn được thêm vào để bảo vệ các cuộn khỏi môi trường và ổn định chúng. Các loại cách điện khác nhau có thể được miêu tả chi tiết tùy vào ứng dụng.

Bên ngoài của máy phát điện là để bảo vệ các bộ phận bên trong khỏi sự ngưng tụ, mưa, bụi và cát thổi vào, vân vân. Hai thiết kế thường được sử dụng là: (i) mái nhỏ giọt mờ và (ii) đóng kín, quạt được làm mát (TEFC). Thiết kế mái nhỏ giọt mờ đã được sử dụng trên rất nhiều tuabin gió bởi vì nó ít tốn kém hơn sự lựa chọn khác và đã được cho là vỏ bọc sẽ đủ để bảo vệ máy phát điện khỏi môi trường. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, thiết kế TEFC có thể bảo vệ tốt hơn lại rất đáng giá.

Một sơ đồ về máy điện cảm ứng điện hình được minh họa trong hình 5.24.



Hình 5.24 : Cấu tạo của máy điện cảm ứng 3 pha điện hình (Tập đoàn quốc tế Rockwell)

5.4.9 Chi tiết hóa máy phát điện

Các nhà thiết kế tuabin gió nói chung không phải là nhà thiết kế máy phát điện. Hoặc là họ chọn các máy điện thương mại có sẵn với sự thay đổi nếu có thì có lẽ cũng rất nhỏ hoặc là họ chỉ rõ các yêu cầu chung của máy được thiết kế. Các đặc điểm cơ bản của các loại máy phát điện quan trọng đã được đề cập ở trước. Dưới đây là bản tóm tắt những điểm cần xem xét chính theo quan điểm của nhà thiết kế tuabin gió.

- Tốc độ hoạt động

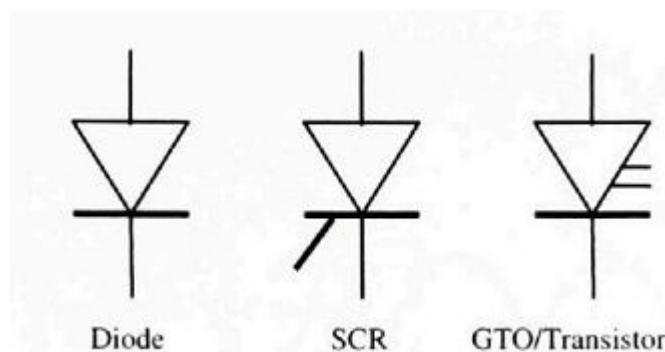
- Hiệu suất khi có tải và tải chi tiết
- Hệ số công suất và nguồn năng lượng phản kháng (các máy điện cảm ứng)
- Đo điện áp (các máy điện đồng bộ)
- Các cách khởi động
- Dòng khởi động (các máy điện cảm ứng)
- Kích thước khung và cân nặng của máy phát điện
- Các loại cách điện
- Bảo vệ khỏi môi trường
- Khả năng chống chịu được lực momen xoắn
- Loại bỏ nhiệt
- Tính khả thi khi sử dụng máy phát điện kép
- Hoạt động với tiếng ồn điện lớn trên dây dẫn điện

5.5 Bộ biến đổi công suất

5.5.1 Khái quát chung về bộ biến đổi công suất

Các bộ biến đổi công suất là các thiết bị được dùng để biến đổi công suất điện từ dạng này sang dạng khác như từ dòng xoay chiều sang dòng một chiều và từ dòng một chiều sang dòng xoay chiều, từ điện áp này sang điện áp khác hoặc từ tần số này sang tần số khác. Bộ biến đổi công suất có rất nhiều ứng dụng trong hệ thống tuabin gió. Chúng đang được sử dụng ngày càng nhiều hơn khi công nghệ đang phát triển và chi phí giá thành giảm. Ví dụ, bộ biến đổi công suất được sử dụng trong bộ khởi động máy phát điện, các tuabin gió có tốc độ khác nhau và các mạng riêng biệt.

Các bộ biến đổi công suất hiện đại là các thiết bị điện tử công suất. Về cơ bản, chúng bao gồm một hệ thống điều khiển điện tử để bật và tắt công tắc điện thường được gọi là van. Một số bộ phận chính được sử dụng trong bộ biến đổi bao gồm diode, bộ chỉnh lưu được điều khiển bởi silicon (SCRs, được xem như là điện dung), công tắc điện dung (GTOs) và điện trở công suất. Các diode đóng vai trò như các van một chiều. SCRs thực sự là các diode có thể được bật bởi xung bên ngoài (ở công) nhưng được tắt chỉ bởi điện áp đi qua chúng bị chuyển đổi ngược lại. GTOs là SCRs mà có thể được tắt giống như trên. Tranzito cần tín hiệu công tiếp tục được ứng dụng để chạy. Toàn bộ chức năng của tranzito giống với GTOs nhưng sơ đồ mạch điện đơn giản hơn. Thuật ngữ “tranzito công suất” được dùng ở đây bao gồm Darlingtons, công suất MOSFETs và Tranzito lưỡng cực công cách điện (IGBTs). Khuynh hướng hiện nay là tăng sử dụng IGBTs. Hình 5.25 chỉ ra các biểu tượng của các bộ phận mạch của bộ biến đổi công suất quan trọng nhất được sử dụng trong chương này.

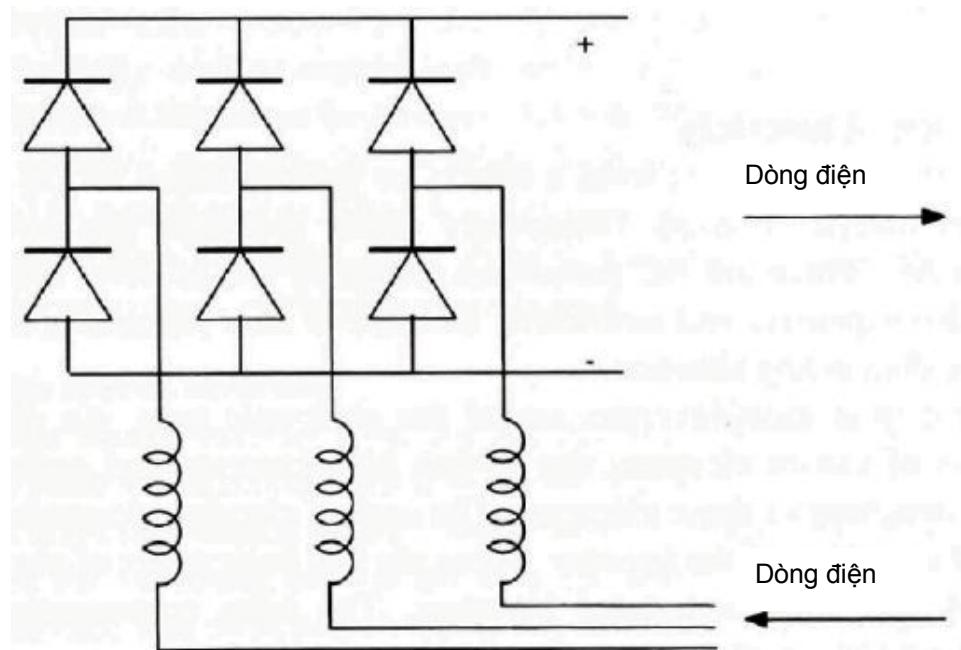


Hình 5.23: Các bộ phận mạch biến đổi; SCR, bộ chỉnh lưu được điều khiển bởi silicon; GTO, công tắc điện dung.

5.5.2 BỘ CHỈNH LƯU

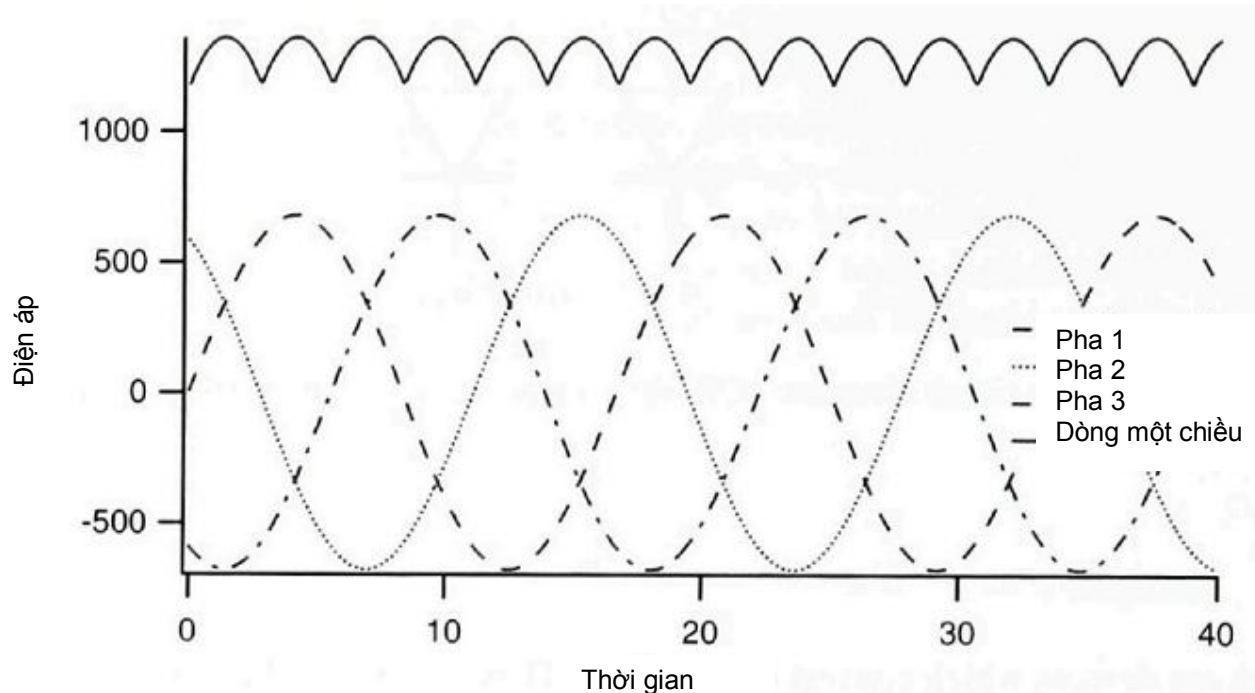
Bộ chỉnh lưu là các thiết bị mà chuyển đổi dòng xoay chiều thành dòng một chiều. Chúng có thể được sử dụng trong: (1) hệ thống gió chạy bằng ác quy hoặc (2) một bộ phận của hệ thống năng lượng gió có tốc độ khác nhau.

Loại đơn giản nhất của bộ chỉnh lưu dùng mạch nối tiếp diode để chuyển đổi dòng xoay chiều sang dòng một chiều dao động. Một ví dụ của một bộ chỉnh lưu như vậy được trình bày trong hình 5.26. Trong bộ chỉnh lưu này, đầu vào là công suất dòng xoay chiều 3 pha, đầu ra là dòng một chiều.



Hình 5.26: Bộ chỉnh lưu nối tiếp diode cho nguồn cung cấp điện 3 pha

Hình 5.27 minh họa điện áp dòng một chiều mà sẽ được sinh ra từ nguồn cung 480 V, 3 pha sử dụng loại bộ chỉnh lưu này được thể hiện trong hình 5.26. Một số bộ phận lọc có thể được thêm vào (như cùng với cuộn cảm được thể hiện trong hình vẽ) để loại bỏ một số dao động. Xem phần 5.5.4 để biết thêm về bộ phận lọc.



Hình 5.27: Điện áp một chiều từ bộ chỉnh lưu 3 pha

5.5.3 Bộ biến đổi

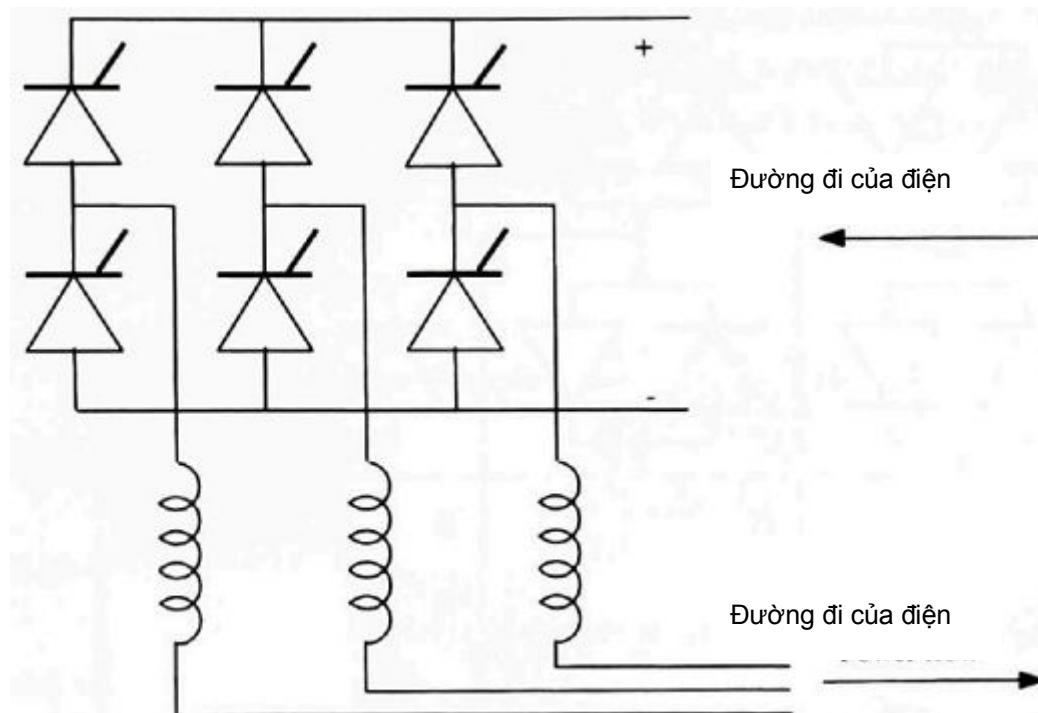
5.5.3.1 Khái quát chung về bộ biến đổi

Nhằm để chuyển dòng một chiều sang dòng xoay chiều, như từ một ác quy hoặc từ một dòng xoay chiều được chỉnh lưu trong tuabin gió tốc độ khác nhau, một bộ chuyển đổi được sử dụng. Trong lịch sử, bộ máy phát điện động cơ đã được sử dụng để chuyển dòng một chiều thành dòng xoay chiều. Những máy phát điện này là những máy phát điện xoay chiều được điều khiển bởi động cơ một chiều. Phương pháp này rất đáng tin cậy nhưng cũng khá đắt và không hiệu quả. Tuy nhiên vì tính đáng tin cậy của chúng nên chúng vẫn được sử dụng trong các trường hợp có nhu cầu.

Hiện nay, hầu hết bộ biến đổi điện tử bao gồm các bộ phận của mạch mà làm biến đổi dòng cao và điều khiển sơ đồ mạch mà liên kết việc chuyển đổi những bộ phận đó. Sơ đồ mạch điện điều khiển chỉ ra nhiều khía cạnh hoạt động thành công của bộ biến đổi. Có hai loại bộ biến đổi điện tử cơ bản là bộ biến đổi điều khiển theo thứ tự và bộ biến đổi tự điều khiển. Thuật ngữ sự điều khiển đề cập tới việc chuyển dòng điện từ phần này sang phần khác của mạch.

Bộ biến đổi được nối với lối đi của điện xoay chiều và bắt các tín hiệu chuyển đổi từ lối đi của điện được biết bởi tên loại biến đổi điều khiển theo thứ tự. Hình 5.28 minh họa mạch bắc cầu SCR khi được sử dụng trong bộ biến đổi điều khiển theo thứ tự 3 pha đơn giản. Mạch điện tương tự với bộ chỉnh lưu bắc cầu 3 pha được thể hiện ở trên nhưng trong trường hợp này, thời gian chuyển đổi các bộ phận trong mạch được điều khiển từ bên ngoài và dòng chảy của dòng từ nguồn cung một chiều sang xoay chiều 3 pha.

Các bộ biến đổi tự điều khiển không cần được nối với lối đi của điện xoay chiều. Vì vậy, chúng có thể được sử dụng cho các ứng dụng độc lập. Chúng có khuynh hướng đắt hơn bộ biến đổi điều khiển theo thứ tự.



Hình 5.28: Bộ chuyển đổi SRC đảo mạch dòng

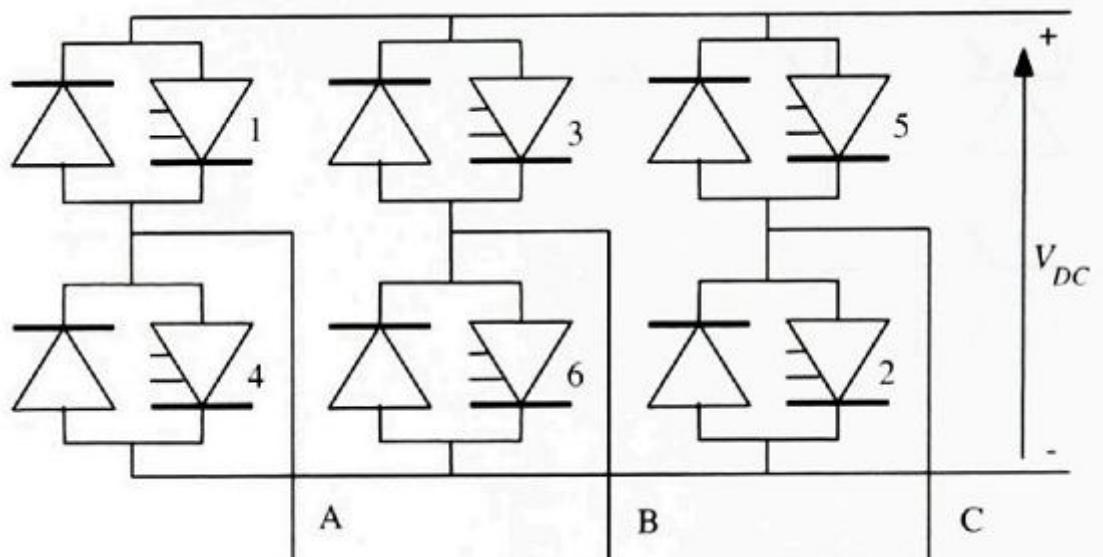
Trên thực tế, thiết kế mạch của một bộ đổi điện rất đa dạng nhưng tựu trung lại thì bộ đổi điện được phân loại thành hai nhóm chính: (i) các bộ chuyển đổi nguồn áp và (ii) các bộ chuyển đổi nguồn dòng. Trong bộ chuyển đổi nguồn dòng, dòng điện từ nguồn một chiều được duy trì ổn định mà không phụ thuộc vào tải. Kiểu bộ chuyển đổi này thường được sử dụng để cung cấp điện áp cho dòng có tải cao trong trường hợp trở kháng ổn định hoặc trở kháng giảm với một tần số từ từ. Hiệu suất tổng thể đạt được là rất tốt (khoảng 96%), nhưng sơ đồ mạch điều khiển tương đối phức tạp. Các bộ chuyển đổi nguồn áp hoạt động trong một nguồn một chiều có điện áp cố định. Chúng là kiểu thường được sử dụng ngày nay cho các ứng dụng năng lượng gió. (cần lưu ý rằng tất cả các thiết bị được đề cập ở đây có thể đóng vai trò như là một chỉnh lưu hoặc bộ đổi điện, vì thế thuật ngữ Bộ chuyển đổi cũng chính xác).

5.5.3.2 Các bộ chuyển đổi nguồn áp

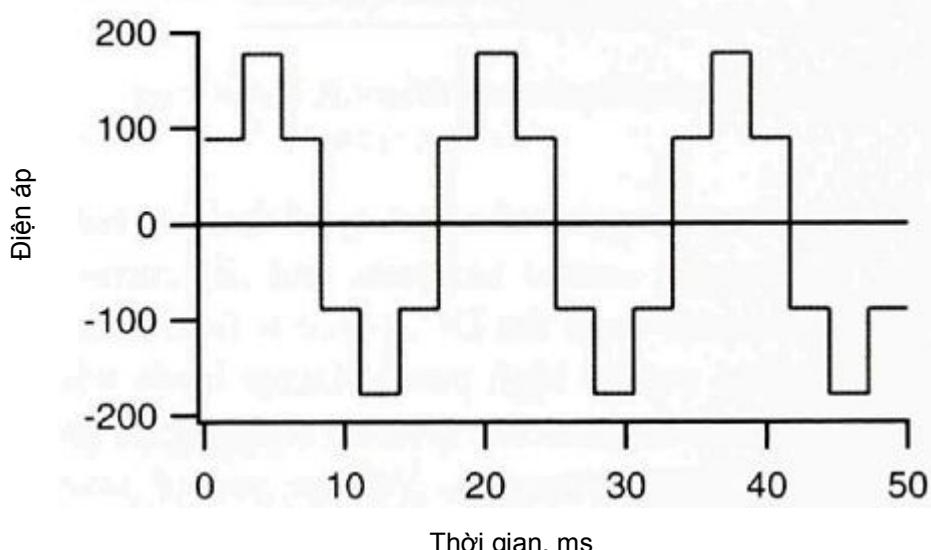
Trong nhóm các bộ chuyển đổi nguồn áp có hai loại cần quan tâm đó là: (1) bộ chuyển đổi nguồn áp 6 xung và (2) bộ chuyển đổi độ rộng xung (PWM).

Kiểu bộ chuyển đổi nguồn áp tự chuyển mạch đơn giản nhất được nêu ở đây là loại chuyển đổi nguồn áp 6 xung. Hoạt động của nó có liên quan đến trạng thái đóng hay ngắt nguồn một chiều thông qua các thành phần khác nhau tại những khoảng thời gian khác nhau. Các thành phần được đóng điện thường là các Thyristor ngắt công (GTOs) hoặc các tranzito nguồn, nhưng chúng ta cũng có thể sử dụng các loại chỉnh lưu được điều khiển bằng chất bán dẫn có sơ đồ mạch ngắt (SRCs). Mạch này kết hợp xung đầu ra với một tín hiệu hình cầu thang gần giống kiểu hình sin. Hình 5.29 minh họa những thành phần chính trong một bộ chuyển đổi kiểu này. Cần nhắc lại là mạch gồm 6 cụm đóng ngắt vốn là một đặc trưng của bộ chuyển đổi 3 pha và các mạch chỉnh lưu, nhưng trong trường hợp này, các trạng thái đóng và ngắt của công đều có thể được điều khiển từ bên ngoài.

Nếu các van được đóng trên mỗi cụm đóng ngắt theo như các số trên sơ đồ, và nếu điều này được duy trì trong 1/3 của một chu kỳ thì sẽ có một điện áp có dạng nhịp xuất hiện giữa 2 pha bất kỳ của một đầu cuối có 3 pha A, B hay C. Một vài chu kỳ có dạng song như vậy (với tần số cơ bản là 60 Hz) được minh họa trong hình 5.30



Hình 5.29: Sơ đồ mạch của bộ chuyển đổi nguồn áp



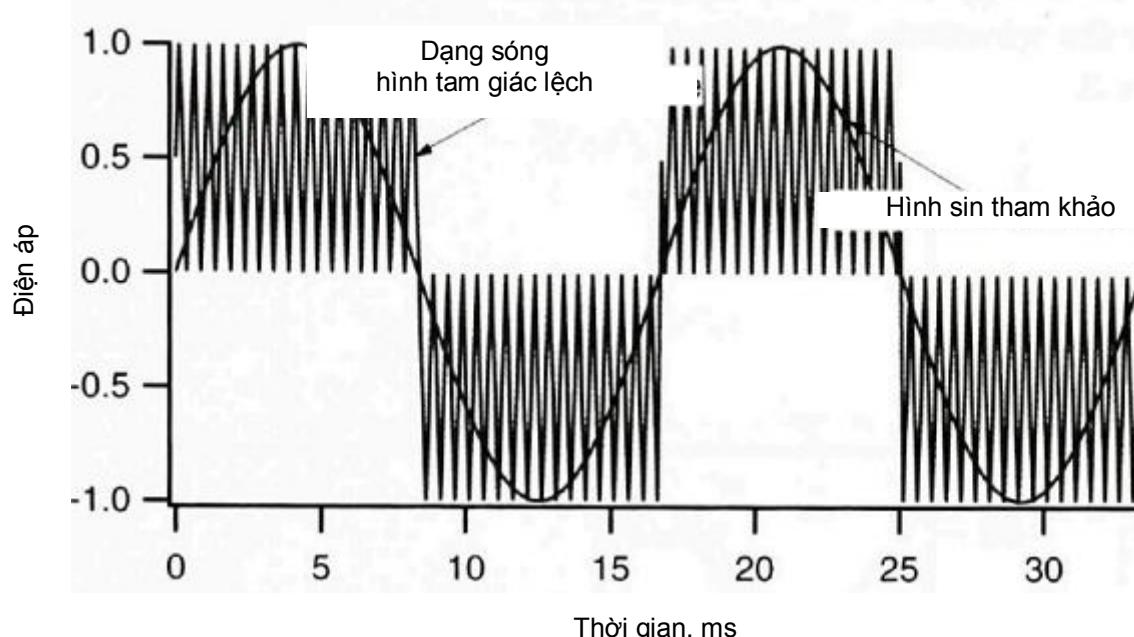
Hình 5.30: Điện áp dạng sóng của bộ chuyển đổi dòng áp

Rõ ràng rằng điện áp biến đổi đều, nhưng nó khác hẳn với kiểu hình sin thường. Sự khác biệt có thể được biểu hiện bằng sự xuất hiện của các tần số dao động hài hòa do kết quả của sơ đồ đóng ngắt. Sự hài

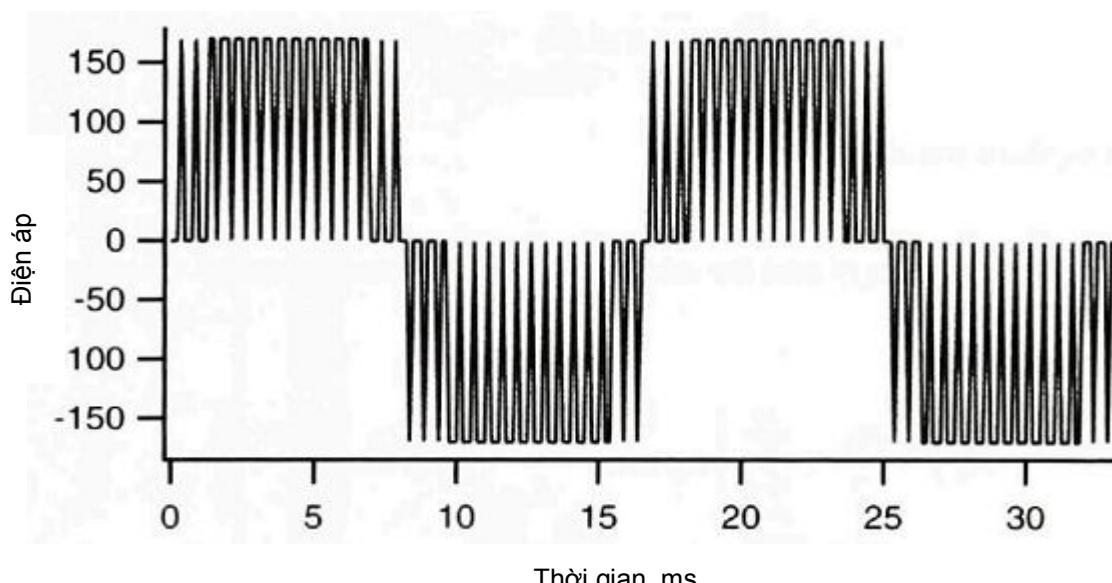
hòa tăng lên do bản chất của việc đóng ngắt. Thông thường thì phải cần tới một số kiều lọc để giảm hiệu ứng của những tần số hài hòa này. Các tần số hài hòa và kiều lọc được đề cập cụ thể hơn trong phần 5.5.4

Trong chuyển đổi bộ rộng xung, một tín hiệu xoay chiều được tổng hợp từ quá trình đóng ngắt của nguồn để tạo ra các xung có độ cao cố định. Độ dài (hay độ rộng) của xung có thể thay đổi. Sẽ cần phải dùng tới nhiều xung trong mỗi nửa bước sóng của song mong muốn. Tần số đóng ngắt nằm trong giới hạn từ 8 tới 20 kHz. Tỉ lệ đóng ngắt được giới hạn theo tỉ lệ mất mát có thể xảy ra trong suốt quá trình đóng ngắt. Thậm chí ngay cả khi có mất mát hiệu xuất của bộ chuyển đổi có thể đạt tới là 94%. Bộ chuyển đổi bộ rộng xung thường dùng các tranzito (loại IGBT) hay GTO) làm các thành phần đóng ngắt.

Hình 5.31 dưới đây thể hiện nguyên lý tạo xung có độ rộng thích hợp. Trong phương pháp này, một sóng hình sin của tần số mong muốn được so sánh với một song có hình tam giác lồi có tần số cao. Mỗi khi song hình tam giác nhỏ hơn sóng hình sin thì tranzito sẽ đóng. Khi song tam giác lớn hơn sóng hình sin thì tranzito sẽ ngắt. Phương pháp tương tự cũng được thực hiện cho nửa chu kì sau của song. Hình 5.31 có hai sóng hình sin tham khảo, nhưng hãy chú ý rằng sóng hình tam giác có tần số thấp hơn rất nhiều so với khi ứng dụng trong thực tế. Đường xung tương đương với hình 5.31 được thể hiện trong hình 5.32. Rõ ràng là các xung (trong góc nhìn thẳng) là rộng nhất khi gần đỉnh, vì thế mà giá trị c\trung bình của điện thế lớn nhất tại đây theo đúng như xác định từ trước. Các song điện áp lúc này vẫn còn là các hình sin thông thường, nhưng nó mang tần số trung hòa thấp vì thế sẽ lọc dễ dàng hơn. Một số phương pháp khác được sử dụng để tạo các xung có độ rộng phù hợp và sẽ được nhắc tới trong Thorborg (1988) và Bradley (1987).



Hình 5.31: Các sóng điều chỉnh độ rộng của xung

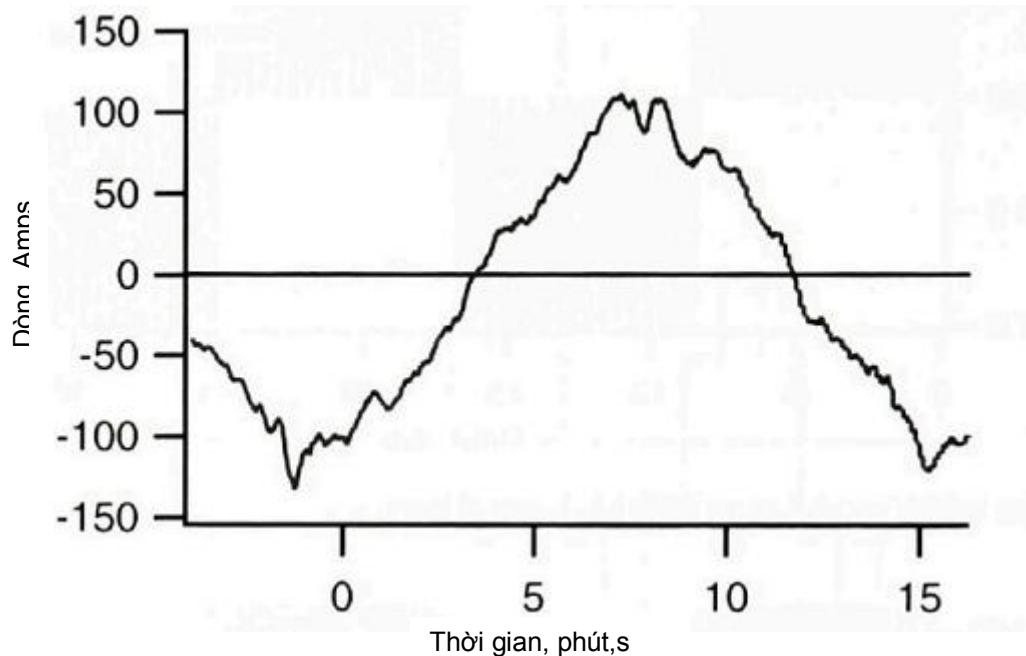


Hình 5.32: Dai xung điện áp điều chỉnh theo độ rộng của xung

5.5.4 Sóng điều hòa

Sóng điều hòa là các điện áp hay dòng xoay chiều có tần số là một dạng kết hợp của một tần số dài lưới cơ bản. Biến dạng điều hòa chỉ hiệu ứng sóng cơ bản của các dòng hay điện áp có tần số cao, không phải hình sin là kết quả của việc hoạt động của thiết bị điện dung các công tắc đóng ngắt cố định. Biến dạng điều hòa chủ yếu được tạo ra bởi các bộ chuyển đổi, các máy động cơ công nghiệp, thiết bị điện, đèn, và máy vi tính... Nó có thể khiến cho các máy biến thế và các cuộn mô tơ quá nóng, gây ra những hỏng hóc cho lớp cách điện của cuộn dây. Nhiệt sinh ra bởi điện trở cuộn dây và các dòng Phu-cô trong các lõi từ là một phần kết quả của dòng vuông góc. Vì thế, dòng chỉ cần tăng nhẹ cũng có thể tạo ra những hiệu ứng lớn lên nhiệt độ hoạt động của động cơ hay máy biến thế. Một ví dụ điển hình trong biến dạng điều hòa của dạng sóng của dòng được minh họa trong hình 5.33.

Biến dạng điều hòa thường được đặc trưng bởi một đơn vị gọi là Tổng biến dạng điều hòa (THD), là tỉ lệ giữa tổng năng lượng trong dạng sóng của dòng tại tất cả các tần số với năng lượng trong dạng sóng của một tần số hệ thống cơ bản. THD càng cao thì dạng sóng càng kém. Chương 8 sẽ đề cập nhiều hơn tới cách tính toán và các tiêu chuẩn của THD.



Bất cứ dạng sóng theo chu kỳ $v(t)$ nào đều có thể được viết dưới dạng chuỗi hình sin và cos Phu-Ri-e như trong phương trình 5.5.1:

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) \right\} \quad (5.5.1)$$

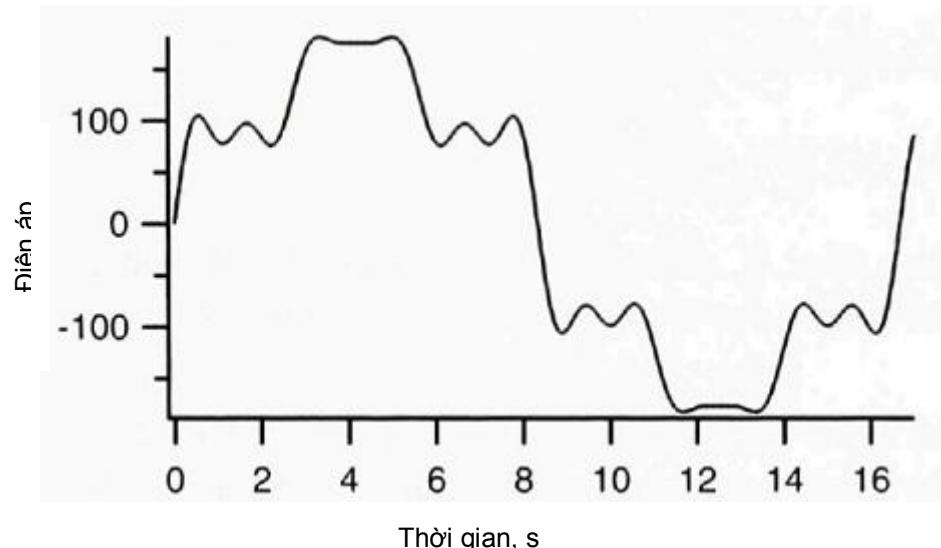
Trong đó, n là một số điều hòa. L là một nửa thời gian của tần số cơ sở

$$a_n = \frac{1}{L} \int_0^{2L} v(t) \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt \quad (5.5.2)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_0^{2L} v(t) \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt \quad (5.5.3)$$

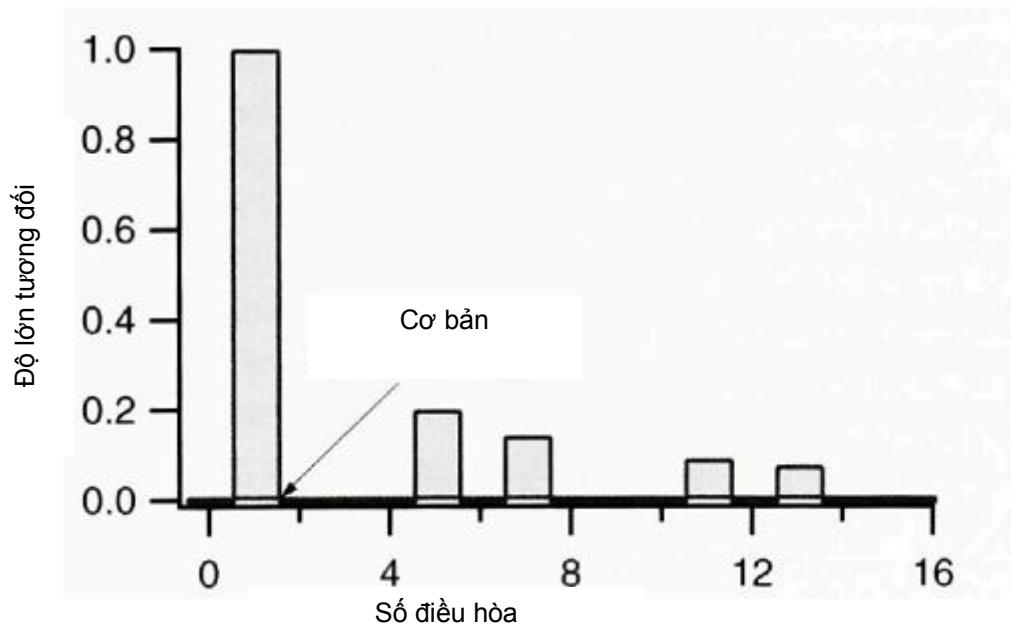
Tần số cơ sở tương ứng với $n=1$. Các tần số cao hơn được xác định sao cho luôn lớn hơn 1. Với dòng và điện áp xoay chiều thì không có giá trị DC, vì thế, $a_0=0$.

Hình 5.34 thể hiện gần đúng điện áp đầu ra của bộ chuyển đổi minh họa trong hình 5.30. Giá trị được tính với 15 tần số trong dãy Phu-ri-e. Cần nhớ rằng nếu nhiều giá trị giới hạn hơn thì phép tính sẽ chính xác hơn và số lượng các gợn sóng sẽ giảm. Vì điện thế thể hiện trong hàm lẻ tức là $f(-x)=f(x)$, nên chỉ các giá trị sin là khác 0



Hình 5.34: Điện áp của dãy Phu-ri-e ; gồm 15 mốc

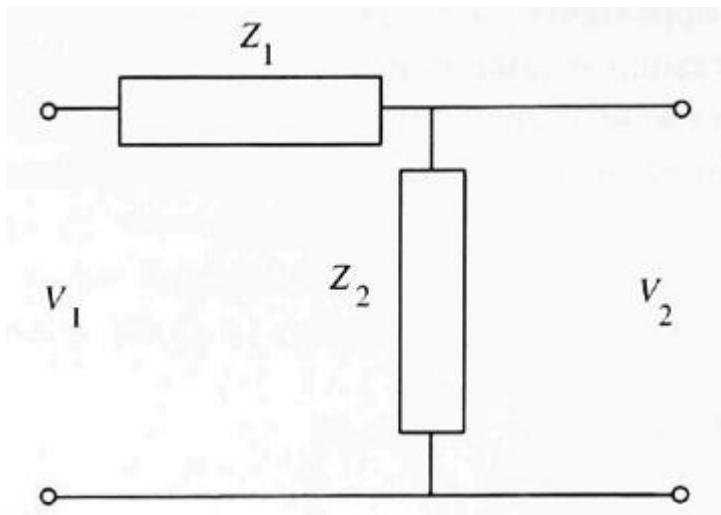
Độ lớn tương đối trong tham số điện áp của các dòng điều hòa khác nhau được biểu diễn trong hình 5.35. (nó có thể được biểu diễn theo cách tất cả các sóng điều hòa cao hơn có giá trị bằng 0 ngoại trừ các sóng điều hòa cho $n=6k \pm 1$ trong đó, $k = 0,1,2,3\dots$ và $n > 0$.)



Hình 5.35: Mức điều hòa tương đối của điện áp

5.5.4.1 Các bộ lọc sóng điều hòa

Do dạng sóng điện áp và dòng từ bộ chuyển đổi điện không bao giờ là các sóng hình sin bình thường nên phải cần tới các bộ lọc điện. Chúng cải thiện dạng sóng và giảm hiệu ứng không tốt của sóng điều hòa. Các loại bộ lọc điều hòa khác nhau có thể được ứng dụng tùy vào một trường hợp. Một dạng chung nhất của bộ lọc điện áp xoay chiều bao gồm trở kháng nối tiếp và một trở kháng song song như mô tả trong hình 5.36.

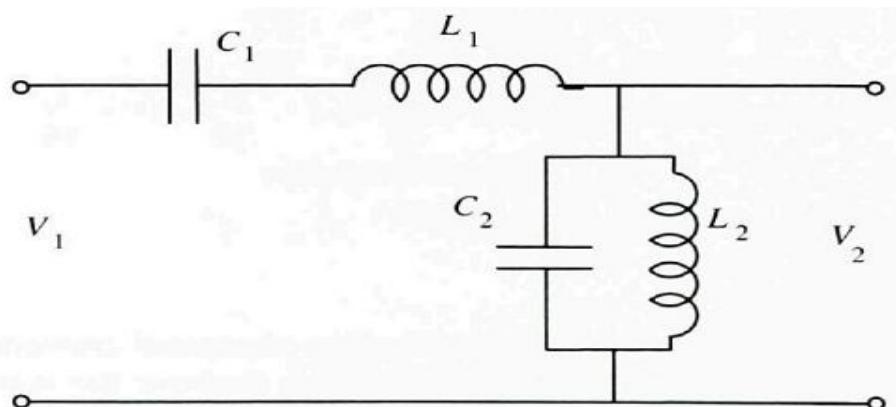


Hình 5.36: Bộ lọc điện áp xoay chiều; V_1 là điện áp xoay chiều đầu vào; V_2 là điện áp xoay chiều đầu ra; Z_1 là trở kháng nối tiếp cộng hưởng. Z_2 là trở kháng song song.

Trong hình 5.36, điện áp đầu vào là V_1 , đầu ra là V_2 . Bộ lọc điện áp lý tưởng làm điện áp cơ sở giảm nhẹ, nhưng cũng đủ để điện áp điều hòa giảm mạnh. Một ví dụ về bộ lọc điện áp xoay chiều là bộ lọc cộng hưởng nối tiếp- song song. Nó bao gồm một cuộn cảm và một tụ được mắc nối tiếp với điện áp nguồn, đồng thời có một cuộn cảm và một tụ khác được mắc song song như trong hình 5.37.

Như đã được đề cập đến nhiều tài liệu kỹ thuật điện, sự cộng hưởng chỉ tồn tại khi các cuộn cảm và các tụ điện có kiểu nối đặc biệt với nhau. Ví dụ, tác dụng của việc cộng hưởng trong một tụ và một cuộn cảm được mắc nối tiếp sẽ tăng điện thế lên rất nhiều trong tụ theo tổng điện áp đi qua hai bộ phận này. Cộng hưởng trong một bộ lọc giúp giới hạn của sóng điều hòa tương đối nhỏ so với điện áp cơ sở. Khi tụ và cuộn cảm mắc nối tiếp thì điều kiện cộng hưởng đòi hỏi:

$$L_1 2\pi f = \frac{1}{C_1 2\pi f} (= X') \quad (5.5.4)$$



Hình 5.37: Bộ lọc cộng hưởng mắc kết hợp. C_1 và L_1 tương ứng với dung kháng và trở kháng mắc nối tiếp; C_2 và L_2 tương ứng với dung kháng và trở kháng mắc song song; V_1 và V_2 tương ứng với điện áp vào và ra.

Khi X' là trở kháng của tụ hay cuộn cảm và là tần số của điện áp cơ sở. Vì tụ và cuộn cảm mắc song song nên cộng hưởng chỉ ra:

$$C_2 2\pi f = \frac{1}{L_2 2\pi f} (= Y'') \quad (5.5.5)$$

Khi $Y'' =$ giá trị nghịch đảo của trở kháng (dẫn nạp) của tụ hoặc cuộn cảm.

Đối với bộ lọc này, xung điều hòa của điện áp ra sẽ được hạ xuống mức tương ứng với mức đầu vào theo tỉ lệ sau đây:

$$f(n) = \left| \frac{V_n}{V_1} \right| = \left| \frac{1}{1 - [n - (1/n)]^2 X' Y''} \right| \quad (5.5.6)$$

Từ phương trình 5.5.6, $f(I) = 1$ và $f(n)$ tiệm cận $1/n^2$ khi n có giá trị cao. Với một giá trị nào đó của n thì mẫu của phương trình 5.5.6 tiến về 0, chỉ ra sự xuất hiện của tần số cộng hưởng. Ví dụ có một tần số cộng hưởng cho giá trị $n > 1$ tại

$$n = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{1}{X' Y''}} + \sqrt{\frac{1}{X' Y''} + 4} \right] \quad (5.5.7)$$

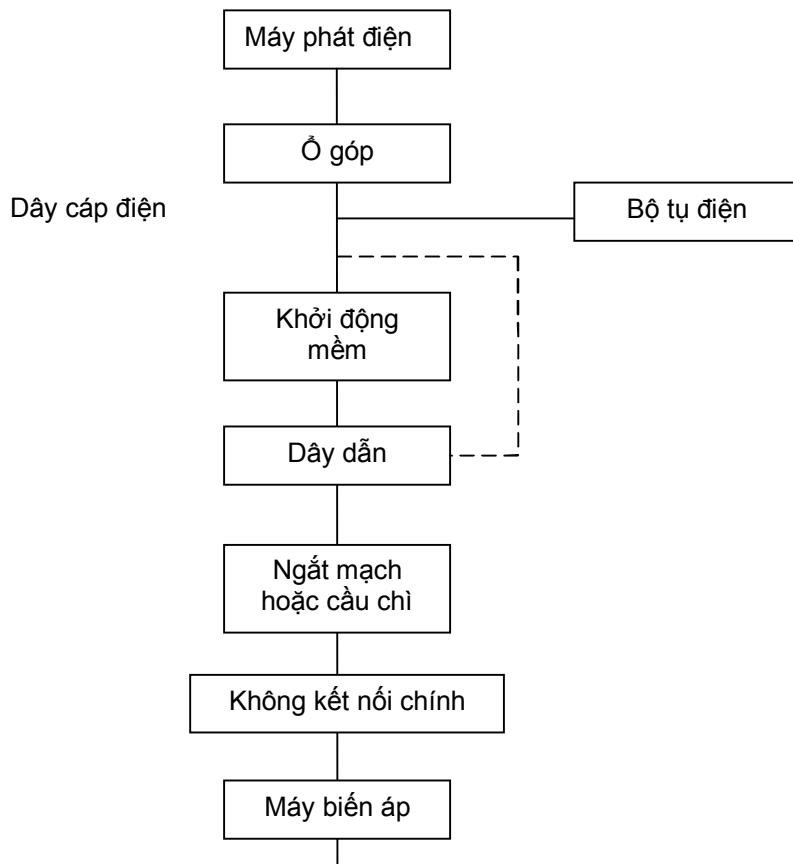
Khi tiệm cận tần số cộng hưởng này thì sóng điều hòa vào sẽ được khuếch đại. Vì thế tần số cộng hưởng này phải được chọn nhỏ hơn điện áp điều hòa thấp nhất lúc đó. Ở đây không đề cập sâu hơn về các bộ lọc. Tuy nhiên, một điều quan trọng là xác định kích cỡ của các cuộn cảm và các tụ trong một bộ lọc vì nó có liên quan tới các xung điều hòa sẽ được lọc. Các xung điều hòa có tần số cao hơn có thể được lọc bằng các linh kiện nhỏ hơn. Việc lọc còn cần chú ý thêm, ví dụ tỉ số đóng ngắt của bộ chuyển đổi theo độ rộng xung càng cao thì càng tốt. Nguyên nhân là tỉ số đóng ngắt cao hơn có thể làm giảm xung điều hòa tần số thấp nhưng lại tăng các xung có tần số cao hơn. Thông tin thêm xem tại Thorborg (1998).

5.6 Các thiết bị điện đi kèm

Có nhiều loại thiết bị điện đi kèm theo quá trình lắp đặt tua bin. Nó bao gồm cả các thiết bị có điện áp cao (điện áp máy phát) hay các thiết bị có điện áp thấp. Hình 5.38 minh họa các linh kiện chính dùng trong việc lắp đặt tua bin. Các đường đứt quãng là để chỉ các bộ phận không có trong quá trình này. Các bộ phận này được đề cập trong phần sau đây.

5.6.1 Các dây cáp điện

Điện phải được truyền từ máy phát xuống tháp và tới các công đóng ngắt ở chân tháp. Quá trình này diễn ra nhờ vào các dây cáp điện. Các máy phát 3 pha có bốn dây dẫn bao gồm cả dây nối đất hoặc dây trung hòa. Các dây dẫn thường làm bằng đồng và được chọn kích cỡ sao cho giảm được tối đa hiện tượng sụt áp và hao phí. Trong hầu hết các tua-bin khí thì dây dẫn được dẫn trực tiếp từ máy phát xuống tháp và tới công tắc chính. Để các dây cáp không bị cuộn và làm hư hại khi tua bin trêch hướng thì người ta để một độ thông khi chúng dòng qua các tháp. Vì thế, các dây cáp điện thường được gọi là các dây thông. Độ thông bảo vệ dây khi tua-bin trêch hướng và khi tua bin trêch tiếp hướng khác thì dây lại trở về trạng thái ban đầu, với một độ thông hợp lý thì các dây cáp sẽ hiếm khi bị quá căng. Tuy nhiên khi chúng căng quá xa thì chúng cần được nới lỏng. Việc này có thể được thực hiện bằng tay sau khi đã ngắt nguồn vào hoặc bằng cách sử dụng thiết bị chuyên.



Hình 5.38: Linh kiện cao áp trong động cơ tua bin gió

5.6.2 Các cỗ góp

Một số tua bin, đặc biệt là các loại nhỏ thì dùng các loại dây cáp nối. Một bó dây cáp được nối với máy phát trong khi một bó khác được nối xuống tháp. Các cỗ góp và chổi than được sử dụng để truyền điện từ bó này sang bó khác. Trong một ứng dụng đặc biệt thì các cỗ góp được gắn trên xi lanh thiết kế dưới đáy khung chính của tua bin. Trục xi lanh nằm trên một trục lệch khiến xi lanh quay khi tua bin đổi hướng. Các chổi than được gắn lên tháp theo cách sao cho chúng luôn tiếp xúc với cỗ góp mà không phụ thuộc vào hướng tua bin. Cỗ góp thường ít được sử dụng trong các máy lớn hơn vì các dây dẫn điện tốt thì lại khá đắt. Bên cạnh đó, cần phải bảo trì khi chổi than bị mài mòn.

5.6.3 Khởi động từ từ

Như đã chỉ ra trong phần 5.4.4, các máy phát cảm kháng sẽ hút dòng dòng lớn hơn nhiều khi khởi động so với khi chúng đang làm việc. Khởi động theo cách này có rất nhiều nhược điểm. Các dòng cao có thể dẫn đến hư hỏng các cuộn máy phát, và có thể gây ra sụt áp cho các tải gần lưới điện. Việc tăng tốc độ ngọt của toàn bộ phần dẫn động tua bin gió sẽ dẫn tới hư hỏng do mồi. Trong các mạng lưới dây bọc có nguồn kích ứng cấp hạn chế thì chúng ta không thể khởi động toàn máy cảm biến cùng một lúc.

Do các dòng cao xuất hiện khi khởi động các máy cảm kháng nên hầu hết các tua bin gió áp dụng một số thiết bị giúp khởi động từ từ. Chúng có thể có nhiều dạng. Nói chung, chúng là các bộ chuyển đổi điện mà ít nhất là có thể cấp một dòng hạ áp cho máy phát.

5.6.4 Các công tắc đóng ngắt

Công tắc chính là một bộ ngắt kết nối dây cáp máy phát với phần còn lại của mạng điện. Khi khởi động từ từ, thì công tắc chính có thể tích hợp với nút khởi động hoặc riêng rẽ. Khi công tắc chính không tích hợp với nút khởi động thì dòng điện được truyền qua công tắc chính chỉ khi máy phát đạt đến tốc độ vận hành bình thường. Tại điểm này, nút khởi động có thể tách hoàn toàn khỏi mạch điện.

5.6.5 Các cầu dao và cầu chì trong sơ đồ mạch

Cầu dao và cầu chì được thiết kế trong giữa máy phát và mạng lưới điện. Chúng có chức năng ngắt dòng khi điện áp tăng quá cao thường là do sai hỏng hoặc đoán mạch. Cầu dao có thể được chỉnh lại khi đã sửa lỗi hỏng còn cầu chì thì phải thay thế.

5.6.6 Bộ ngắt chính

Một công tắc ngắt chính thường được thiết kế giữa mạng lưới điện và toàn bộ hệ thống điện tua bin gió. Công tắc này thường để đóng, nhưng đôi khi được mở khi làm việc với các linh kiện điện của tua bin. Bộ ngắt chính cần phải được mở nếu cần làm việc với công tắc chính và trong bất cứ trường hợp nào đều cung cấp thêm một giá trị đo an toàn trong suốt bất cứ vận hành nào.

5.6.7 Các tụ chỉnh yếu tố nguồn

Các tụ chỉnh yếu tố nguồn thường được sử dụng để cải thiện yếu tố nguồn của máy phát với vai trò như một thiết bị. Chúng được kết nối rất gần với máy phát sao cho càng tiện lợi càng tốt, nhưng điều này đặc biệt xảy ra tại chân tháp hoặc trong một tòa nhà điều khiển gần đó.

5.6.8 Các dòng tải của tua bin gió.

Có nhiều dòng tải gắn liền quan đến vận hành của tua bin gió. Chúng có thể bao gồm các bộ kích, các mô tơ thủy lực, các mô tơ bánh răng, bộ chỉnh hướng, máy nén khí, các máy tính điều khiển... Các linh kiện này đòi hỏi tải điện hình từ 120V tới 240V. Do điện áp máy phát thường cao hơn mức này nên các thiết bị hạ áp, hoặc máy hạ áp cần được sử dụng.

Tài liệu tham khảo

- Bradley. D. A. (1987) *Power Electronics*, Van Nostrand Reinhold (UK), Wokingam, England.
- Brown, D. R., Hamilton, E. P. (1984) *Electromechanical Engineering Conversion*, Macmillan Publishing, New York.
- Edminister, J. A. (1965) *Electrical Circuits*. Schaum's Outline Series in Engineering, McGraw Hill Book Co., New York.
- Fuchs, E. F., Erickson, R. W., Fardou. A. A. (1992) Permanent Magnet Machines for Operation with Large Speed Variations, *Proc. of the 1992 American Wind Energy Association Annual Conference*, American Wind Energy Association, Washington DC.
- Johnson, Gary L. (1985) *Wind Energy Systems*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., Adulwahid, U., Rogers, A., McNiff, B. P. (1996) A Graphical Interface Based Model for Wind Turbine Drive Train Dynamics, *Proc. of the 1996 American Wind Energy Association Annual Conference*, American Wind Energy Association, Washington DC.
- Nasar, S. A., Unnewehr, L. E. (1979) *Electromechanics and Electric Machines*, John Wiley. New York.
- Sarma, M.S. (1985) *Electric Machines, Steady-State Theory and Dynamic Performance*, West Publishing Company, St. Paul, MN.
- Thorborg, K. (1988) *Power Electronics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Torrey, D. A., Childs. S. E. (1993) Development of a Variable Reluctance Wind Generator, *Proc. Of the J993 American Wind Energy Association Annual Conference*, American Wind Energy.