

6. SENKRON MAKİNALAR

6.1. Giriş

Küçük güçlerde kutupları sabit mıknatıslı, büyük güçlerde elektromıknatıslı olarak imal edilirler. Kutupları rotora yerleştirilmiş olup, statoruna (asenكرون makinada olduğu gibi) çok fazlı alternatif akım sargısı yerleştirilmiştir (Şekil 2.3). Senkron makina generatör yada motor olarak çalıştırılabilir. Şebekeye bağlı olarak çalışan senkron makina için enerji dönüşümünün şartı makinanın senkron devirde dönmesidir. Enerji üreten bir makina;

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

sabit hızında döner. Bu, kutup tekerleğinin statordaki döner alan hızıyla senkron olarak dönmesi anlamına gelir. Bu yüzden senkron makina olarak anılır. Çoğunlukla generatör olarak kullanılan senkron makinaların güçleri bu günlerde 2000 MVA'e kadar ulaşmıştır. Stator hat gerilimleri ise 6, 15, 20, 27 kV'tur.

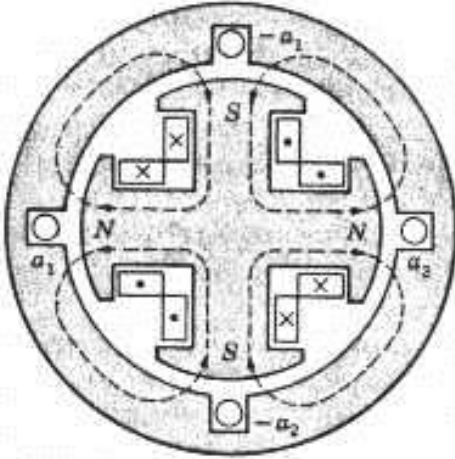
Senkron makinalar hava, su veya direk hidrojen soğutmalı olabilmektedirler. Hidrojenli soğutma genellikle 1000 MVA 'den büyük güçlerde kullanılmaktadır.

7. SENKRON MAKİNALARIN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

7.1. Giriş

Yapı itibariyle doğru akım makinasının tam tersidir. Doğru Akım makinasında kutuplar duran kısımda ve hareketli rotorda alternatif akım üretilirken (kollektör ile doğrultulmakta idi), senkron makinada alternatif akım üreten sargılar statora alınmış ve kutuplar ise hareketli olan rotora yerleştirilmiştir (Şekil 7.1). Bunun nedeni orta gerilim üreten yüksek güçlü, çok fazlı alternatif akım sargılarının rotorda izolasyonun sağlanmasının güç olmasındandır.

Hareketli kutup tekerleğine, yalıtılmış fırça - bilezik düzeni üzerinden doğru akım verilerek, zamana göre yön değiştirmeyen doğru bir alan üretilir.



Şekil 7.1 Çıkık kutuplu senkron makina

7.2. Çalışma Prensibi

Senkron makinalar aynı konstrüksiyon ile hem motor ve hem de generatör olarak işletilebilirler. Faraday Yasası ($E = B \cdot \ell \cdot v$) uyarınca, manyetik alan veya statora yerleştirilen iletkenler hareket etmeyince iletkenlerde gerilim endüklenmez. Bu nedenle rotor bir tahrik aracı tarafından döndürülür. Böylece kutuplarda oluşturulan

genliği değişmeyen bu doğru alan, rotorun (kutup tekerleği) döndürülmesi ile hareket ederek statordaki iletkenleri keser ve bu iletkenlerde gerilim endükler. Generatör işletmesini açıklayan bu çalışmada, doğru akım ile uyartılmış kutup tekerleğine (rotor) mekanik enerji verilip, statordan elektrik enerjisi (alternatif akım) elde edilir.

Rotorun döndürülmesi suretiyle genliği değişmeyen ve hareket etmeyen alan döner alan haline gelir. Şayet statordaki çok fazlı alternatif akım sargısına çok fazlı alternatif akım uygulanırsa, statorda döner bir manyetik alan oluşur. Bu alanın hızı;

$$n_s = \frac{60 \cdot f_l}{p} \quad (7.1)$$

olur. Kutup tekerleğinin doğru akım ile uyartılmış ve bir dış tahrik aracı ile n_s devrine getirilip serbest bırakıldığı düşünülürse (bu olaya senkronlama denir), stator ve rotor alanları birbirine kenetlenecek ve rotor statoru n_s hızında takip edecektir. Bu takipte rotor bir dış fren makinası ile az miktarda yüklenecek olursa, rotorun S kutbu kenetlenmiş olduğu statorun N kutbundan küçük bir açı farkı ile geride kalır. Bu motor çalışmadır ve daha sonra yük açısı olarak tanımlanacak olan δ yük açısının negatif olacağını gösterir (rotor geriden gelmektedir).

Generatörde ise durum tersinedir. Rotor alanı, statorda yük akımlarının oluşturduğu döner alandan ileridedir. Zira rotordan verilen mekanik güç, statordan çekilen elektrik gücü frenlenir. Dolayısı ile, aynen motorda olduğu gibi, rotorun belirli bir moment ile tahrik edildiği düşünülürse, statordan çekilen elektrik gücü arttıkça stator alanı kutup tekerleği alanın gerisinde kalacaktır. Bu nedenle yük açısı $\delta > 0$ olacaktır.

7.3. Stator Yapısı

Stator ve statorda bulunan çok fazlı endüvi sargısı yapı itibarı ile aynı asenkron makinadaki gibidir (bkz. Kısım1 - Bölüm 1.3, 2.3). Stator; stator manyetik malzemesinin değişken manyetik akı içinde bulunmasının neden olacağı demir kayıplarını azaltmak için, manyetik domenleri yönlendirilmemiş $\sim 0.5\text{mm}$ kalınlığındaki silisyumlu saçların paketlenmesi ile oluşturulur.

Makina gücü arttıkça, akımın ve dolayısı ile kayıpların artmaması için stator m_1 fazlı ve orta gerilimli olarak tasarlanır. m_1 fazlı alternatif akım sisteminde, stator çevresinde her bir faza $2\pi/m_1$ radyanlık bölgeler tahsis edilir (Şekil 2.3).

Ardışıl stator olukları arasındaki geometrik açı

$$\gamma_g = \frac{2 \cdot \pi}{Q_1} \text{ [rad]}$$

(Q_1 : Stator oluk sayısı) iken dış tahrik makinası tarafından döndürülen p çift kutuplu kutup tekerleğinin ardışıl stator oluklarında endüklediği gerilimler arasındaki elektriki açı ;

$$\gamma_e = p \cdot \gamma_g = p \cdot \frac{2 \cdot \pi}{Q_1} \text{ [rad]} \quad (7.2)$$

olur ve stator faz sargılarının uçları, $\frac{2 \cdot \pi}{m_1}$ kadar elektriki açı farklı oluklardan çıkartılır. Üç fazlı stator için faz sargıları uçları (asenكرون makinada olduğu gibi) u-x, v-y, w-z olarak adlandırılıp bir terminal kutusunda toplanılır.

7.4. Rotor Yapısı

Kutuplar (d.a. makinalarında olduğu gibi) dökme çelikten veya stator yapısında bahsedilen silisyumlu saçlardan yapılmaktadır. Ayrıca küçük güçlü senkron makinaların kutuplarında sabit mıknatıslarda kullanılmaktadır.

Kutup tekerlekleri tip bakımından, çıkık kutuplu rotor ve yuvarlak kutuplu rotor olmak üzere ikiye ayrılır.

7.4.1. Senkron generatörde rotor hızının seçilmesi

Elektromekanik enerji dönüşümü düzeneklerinde yüksek verimin sağlanması için senkron generatörün hızı, tarık makinası veriminin yüksek olduğu bölgede (hızda) planlanır.

Tahrik makinası, Francis veya Kaplan türbini (Hidrolik santraller) olduğunda yüksek verimli devir sayıları 60 - 300 dev / dak arasındadır. (7.1) nolu bağıntıdan;

$$p = \frac{60 \cdot f_1}{n_s}$$

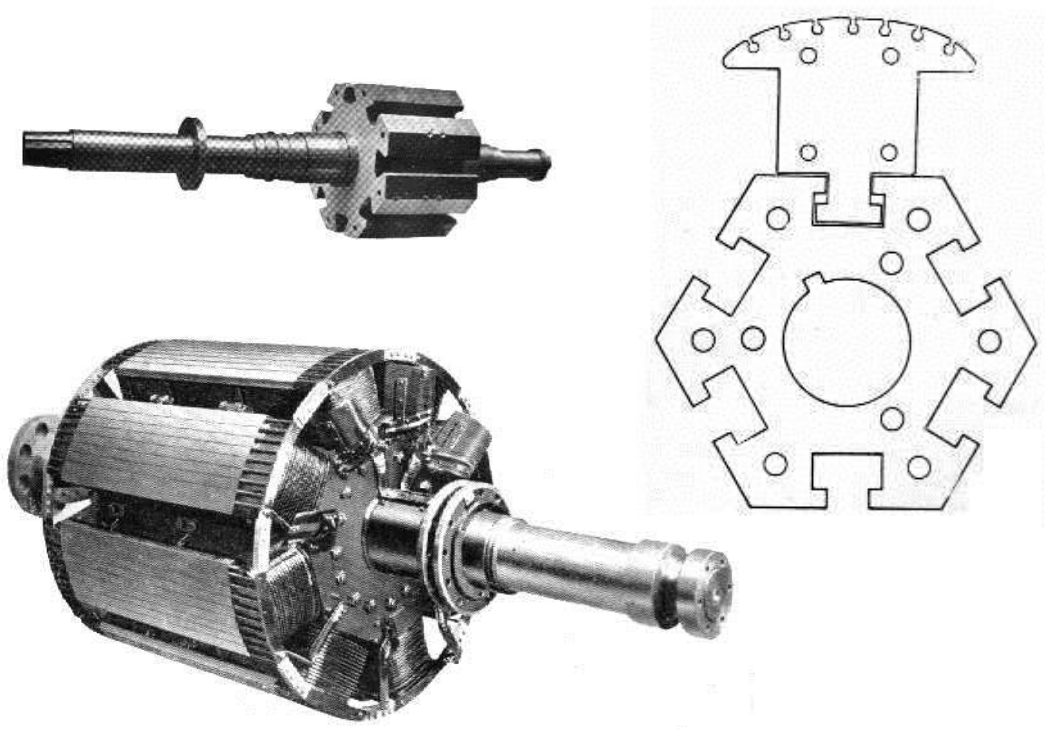
olacağından, küçük n_s 'lerde büyük çift kutup (p) sayıları gerekmektedir. Büyük kutup sayılarında rotor çevresine sinüsoidal yayılmış bir manyetik endüksiyon üretebilmek için uygun rotor yapısı, çıkık kutuplu rotordur. Çok sayıda çıkık kutuplu rotor çekirdeği çevresine montajlanması durumunda rotor çapı oldukça büyümekte (büyük güçlü makinalarda 10-16 m) ve makinanın sabitleştirilmesi dik rotor durumunda kolay olabilmektedir. Bu yüzden hidrolik santrallerde rotor dikey olarak dönmektedir. Bu rotorlarda aksiyel uzunluk çapa göre küçüktür.

Buhar türbinleri ise yüksek devirlerde (çoğunlukla 3000 dev / dak) verimli çalışmaktadır. Yüksek devirde çalışacak senkron generatörün rotorunun çevresel hızının, atalet (savrulma) momentinin küçük tutulması için rotor çapının küçük yapılması gerekmektedir. Bu şartları tatmin eden rotor tipi, yuvarlak rotorlu yapıdır. Makina gücünün temini için aksiyel uzunluk çapa göre büyüktür. Tipik bir örnek verilirse, 1200 MVA 'lık bir yuvarlak rotorlu bir senkron generatörün rotoru 100 ton, çapı 1250 mm, aksiyel uzunluğu 8m 'dir. Yuvarlak rotorlu makinalar çoğunlukla yüksek devir sayıları için tasarlandıklarından, bu tip makinalara turbo generatör/motor da denilir.

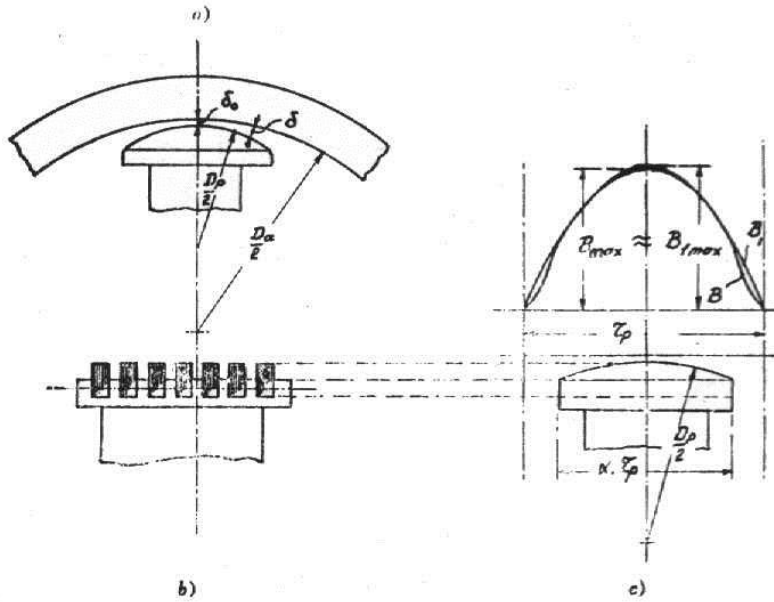
Paralel çalışan generatörlerden biri aşırı yüklenmeden dolayı senkronizmadan çıkarsa bu senkron generatörün rotoru ambale olur ve nominal hızının %180-250 katına çıkar. Bu durum, savrulma kuvvetleri nedeni ile kutup tekerleğini ciddi şekilde zorlayan bir olaydır. Generatör paralel çalışmadan çıkartılmalıdır. Şayet çıkartılmazsa, şebekeye daha yüksek frekanslı genlik modülasyonlu bir akım verir. Ambale olma durumu sistemin döner makina aksamı ve hareket aktarma organları için ciddi tehlikeler doğurabilir.

Aşırı yükten dolayı senkronizması kırılan bir senkron motor moment üretmez ve rotor durmaya giderken şebekeden de aşırı akım çekilir.

7.4.2. Çıkık kutuplu rotor



Şekil 7.2 Kutup çekirdeği, çıkık kutup, montajlanmış rotor ve amortisör sargıları



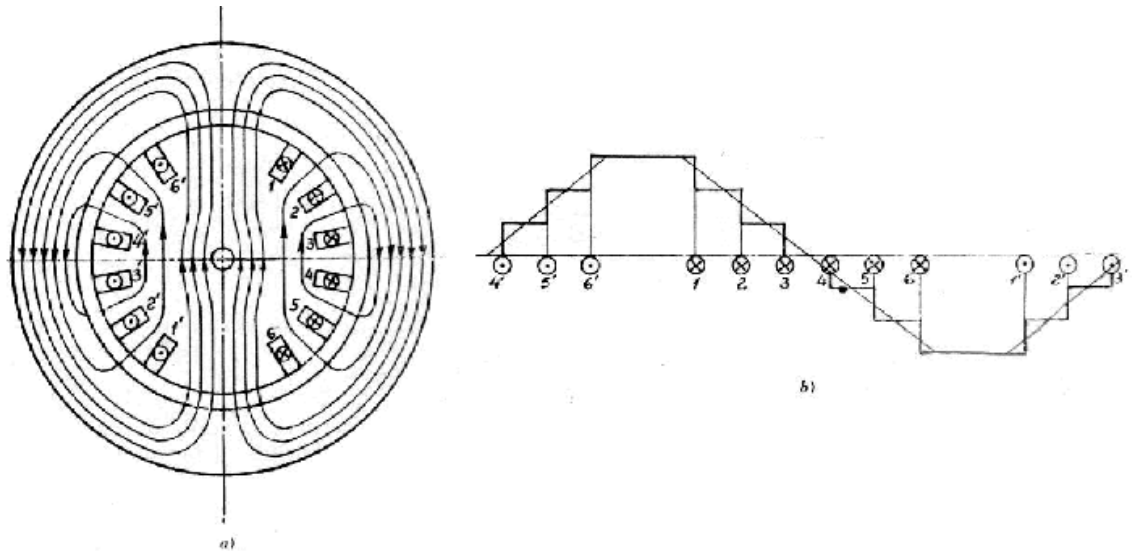
Şekil 7.3 a) Çıkık kutup ve endüvinin eğrilik yarıçaplarının farklılığı
b) Çıkık kutuba ait çevresel manyetik endüksiyon dağılımı

Hava aralığı endüksiyonunun sinüsoidal dağılması için kutup başlarına özel şekiller verilir (Şekil 7.3). Endüksiyonda bulunabilecek yüksek harmonik döner alanları ve mekanik titreşimleri bastırmak için kutup başlarına açılan oluklara kısa devre

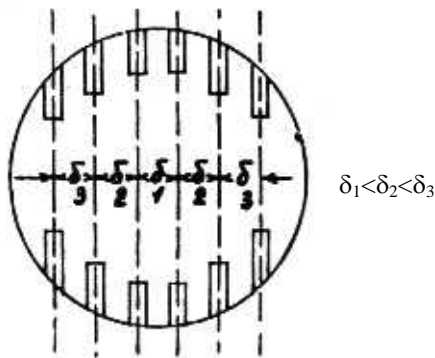
amortisör sargısı yerleştirilir ve bu sargılar çevre boyunca kısa devre halkaları ile birleştirilir (sincap kafesli asenkron motorlardaki gibi). Çıkık kutuplu makinalarda hava aralığı kutup taksimatının $\frac{1}{50}$ ile $\frac{1}{60}$ 'ı kadardır.

Çıkık kutuplar çevresine sarılan uyarma sargıları aralarında seri bağlandıktan sonra, milden izole edilmiş bilezik-fırça düzeni ile ayrı bir terminal kutusuna çıkartılır ve I - K harfleri ile adlandırılırlar.

7.4.3. Yuvarlak rotor



Şekil 7.4 a) Yuvarlak rotorlu bir senkron makinanın uyarma sargısına ait kuvvet çizgileri dağılışı
b) Böyle bir kutup tekerleğine ait mmk eğrisi

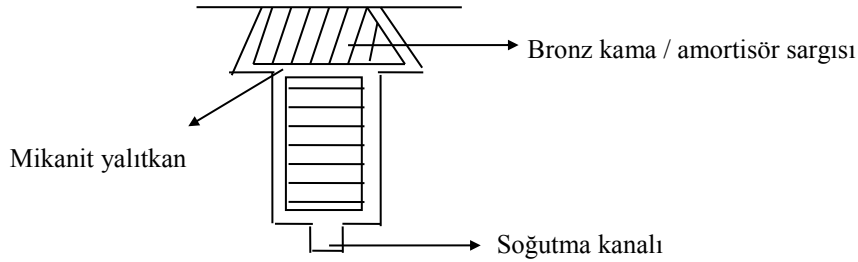


Şekil 7.5 Oluk aralıkları birbirinden farklı yuvarlak kutup tekerleği

Yuvarlak rotorlu generatör çoğunlukla 3000 dev / dak yada bazen 1500 dev / dak için tasarlandıklarından bu generatöre turbo generatör (turbo alternatör) de denilir. Bu hızda rotorun savrulma kuvvetlerine mukavemetini arttırmak için, dökme çelikten

imal edilip hassas bir balans ayarına tabii tutulur. Silisli saçtan yapılan rotorlarda vardır.

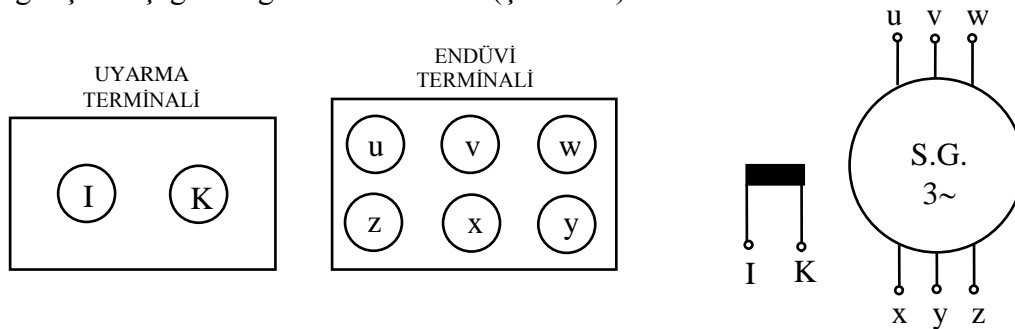
Sinüsoidal endüksiyon dağılımının sağlanması için rotorun 2/3 sarılıp 1/3'ü boş bırakılır. Bu yapıda hava aralığı akısında 3 ve 3'ün katı harmonik alanlar oluşmaz. Alanın çeyrek dalga simetrisi olduğundan (şekil 7.4a). çift harmonikler yoktur. Ayrıca tek fonksiyon olması nedeni ile sadece sinüslü harmonikler vardır. Bazı durumlarda harmonik eliminasyonu yapmak için oluk aralıkları şekil 7.5'te olduğu gibi farklı yapılır. Oluk ağzına kısa devre amortisör (damper) sargısı yerleştirilir. Endüvi rotor arasındaki hava aralığı çıkık kutupluya göre daha büyüktür. ($\delta \approx \frac{1}{40} \tau_p$) dir.



Şekil 7.6 Tipik bir turbo rotor oluşu

7.5. Senkron Makinanın Terminal Kutuları ve Gösterilimi

Makinada alternatif akım ve doğru akım sargıları için ayrı terminal kutuları bulunup, sargı uçları aşağıdaki gibi isimlendirilir (Şekil 7.7).



Şekil 7.7 Senkron makinanın terminal kutuları ve sembolü

Kutup sargılarının uçları milden yalıtılmış bilezik ve fırça düzeni ile terminale çıkartılmıştır (I, K). Çoğunlukla 110 - 220V doğru gerilim ile beslenirler.

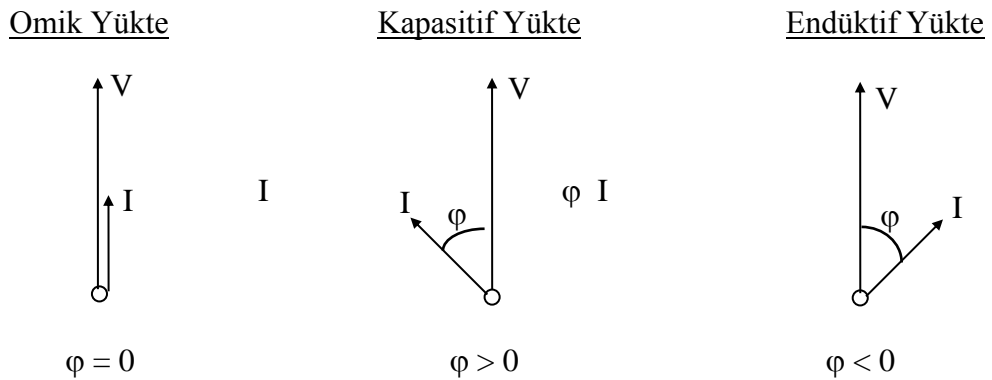
8. SENKRON MAKİNADA ENDÜVİ REAKSİYONU

Senkron makinanın endüvisinde üretilen alternatif gerilim bir yükü beslediğinden dolayı, yükün karakteri makinanın davranışlarına etki eder. Yükün karakteri akım ile gerilim arasındaki faz farkına bağlıdır. Faz farkı; akımın gerilime mukayese ile daha önce veya daha sonra maksimuma erişmesi ile ortaya çıkar. Akımın gerilime göre pozitif fazör dönüş yönüne göre geri kalması endüktif ($\varphi < 0$), ileri gitmesi kapasitif ($\varphi > 0$), aynı fazda olması ise ($\varphi = 0$) omik yük olarak tarif edilir. Endüktif yük $Z = R + j X_L$, kapasitif yük $Z = R - j X_C$ ve omik yük ise $Z=R$ ile verilir. Bu yüklere uygun akımlar, gerilim referans alınarak ($V \angle 0$) yazılırsa;

$$I_R = \frac{V}{R}, \quad I_L = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \angle -|\varphi|, \quad I_C = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \angle +|\varphi|$$

olur. Endüktif yükte; $\varphi = \arctg \left(\frac{X_L}{R} \right)$, kapasitif yükte; $\varphi = \arctg \left(\frac{X_C}{R} \right)$ omik yükte; $\varphi = 0$ olur.

Bu ifadelerden yük akımı ile terminal gerilim fazörleri arasındaki ilişkiler Şekil 8.1'deki gibi verilebilir.



Şekil 8.1 Omik, kapasitif ve endüktif yüklerde V-I fazörleri

Şimdi çıkık kutuplu senkron makinanın endüvisindeki sargılardan farklı

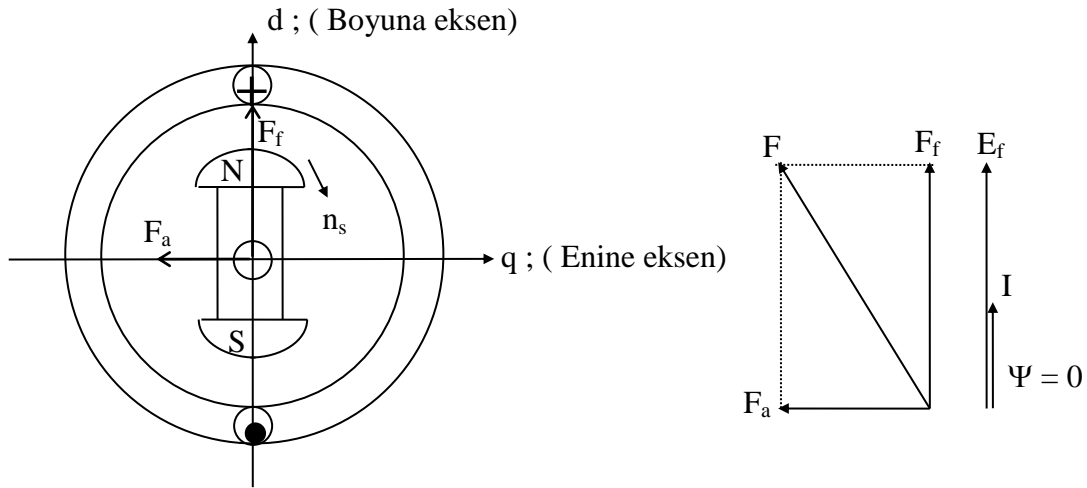
karakterde yük akımlarının geçtiğini düşünerek, makina içerisindeki mmk değişimlerini generatör ve motor işletme durumları için inceleyelim.

8.1. Generatör İşletmesi

Bunun için senkron generatörün n_s hızında tahrik edildiğini, kutup tekerleğinin doğru akım ile uyarıldığını ve statora aşağıdaki karakterlerde yükler bağlandığını kabul edelim.

8.1.1. Omik yük durumu

Endüklenen gerilim ile sargıda akan akım arasında faz farkı yoktur. Yani gerilimin maksimum olduğu yerde akımda maksimum olur. Bu durum ise iletken tam boyuna eksende iken meydana gelir. Çünkü akı kavramasının sıfır olduğu yerde gerilim maksimum olur. Şekil 8.2'deki bobine akım yönü ve sağ el tirbuşon kaidesi uygulanarak endüvi ve bileşke alanın yönü bulunur.



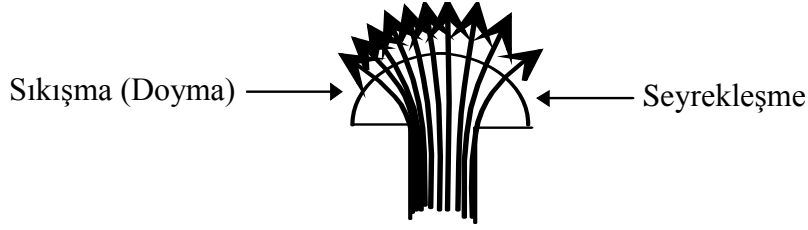
Şekil 8.2 Omik yüklü generatörde endüvi reaksiyonu

Yukarıdaki E_f ile I arasındaki açığa (ψ) iç faz açısı denir. E_f ; kutup tekerleği akısının endüvi sargısının 1 fazında endüklenen emk'dır. Makinadaki bileşke mmk;

$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_f \quad (8.1)$$

olacağı için, d ekseninden sapan bileşke akı, kutup ayaklarında aşağıdaki gibi

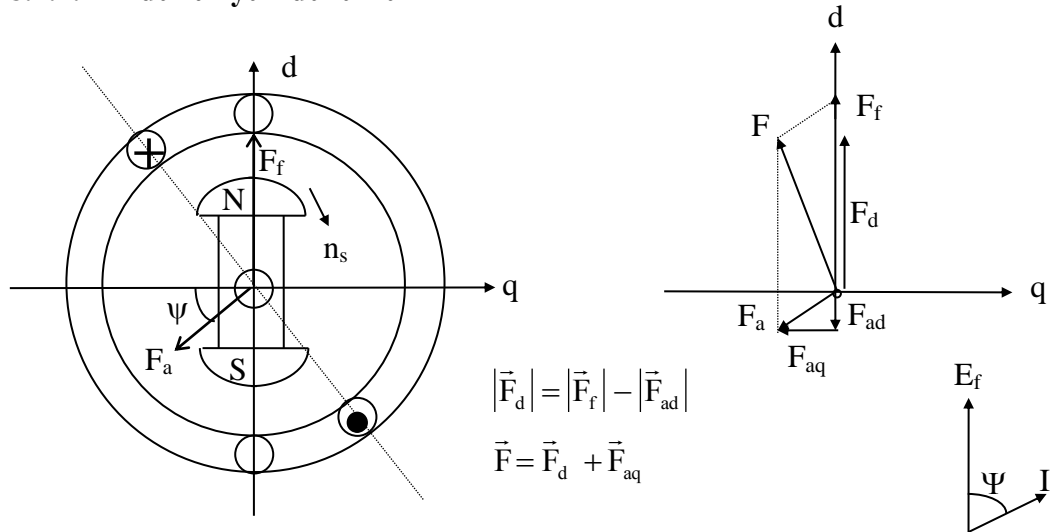
yığılmalar ve doymalar oluşturur (Şekil 8.3).



Şekil 8.3 Senkron generatörde endüvi reaksiyonu sonucunda akının yön değiştirmesiyle kutup ayaklarında oluşan akı yığılma ve seyrekleşmeleri

Yığılmalar doymaya neden olacağından dolayı, akıdan tam istifade edilemez. Bu nedenle omik yüklü çalışmada, generatör terminal geriliminde az miktarda düşme olur. F_a 'nın F_f 'ye 90° dik olmasından dolayı, omik yüklü endüvi alanına enine alan denir. Bu çalışma durumunda, kutup ayaklarındaki (az miktarda) yığılmalar nedeniyle kutup alanı endüvi alanı tarafından az miktarda zayıflatılır (Şekil 8.2).

8.1.2. Endüktif yük durumu

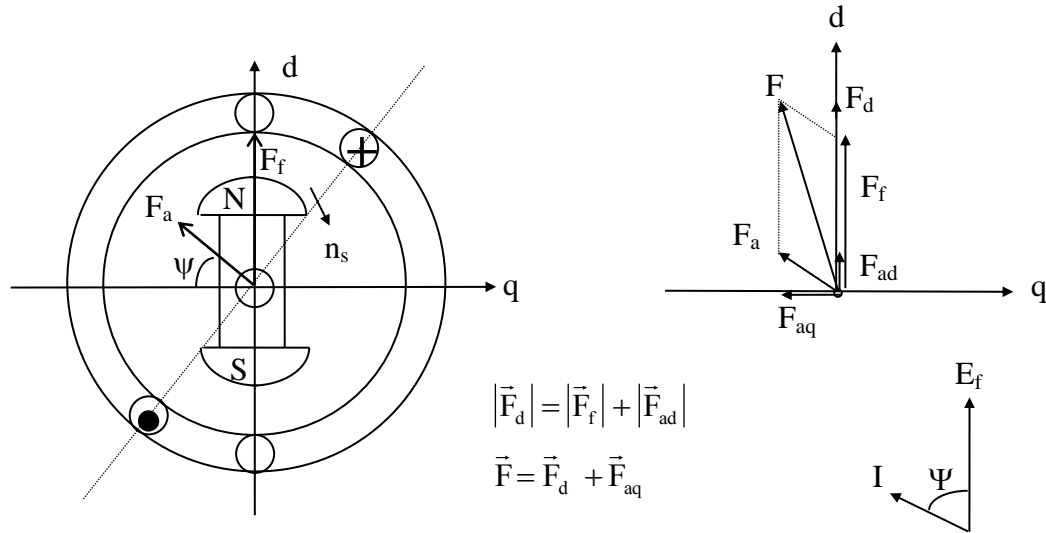


Şekil 8.4 Endüktif yüklü senkron generatörde endüvi reaksiyonu

Akım gerilime göre dönüş yönünde ψ kadar geri fazdadır. Yani gerilim maksimum değerini boyuna eksen almışken, akım bu noktadan ψ açısı kadar sonra maksimum değerini almıştır. Bu durumda F_a iki bileşene ayrılır ; F_{ad} , F_{aq} . F_{ad} ; F_f uyarma alanına tam zıt yönde olup F_d diye anılan boyuna eksen bileşke mmk'ini zayıflatır (Şekil 8.4). Diğer taraftan F_{aq} enine bileşeni ; bileşke alan yönünü saptırıp, doyma ve seyrekleşmelere neden olur (Şekil 8.3).

Yukarıdaki nedenlerden dolayı artan endüktif yük akımı ile (özellikle $\psi = 90^\circ$ ise) generatörün terminal gerilimi aşırı derecede düşer. Yani endüktif alanı esas kutup alanını kuvvetlice zayıflatır.

8.1.3. Kapasitif yük durumu



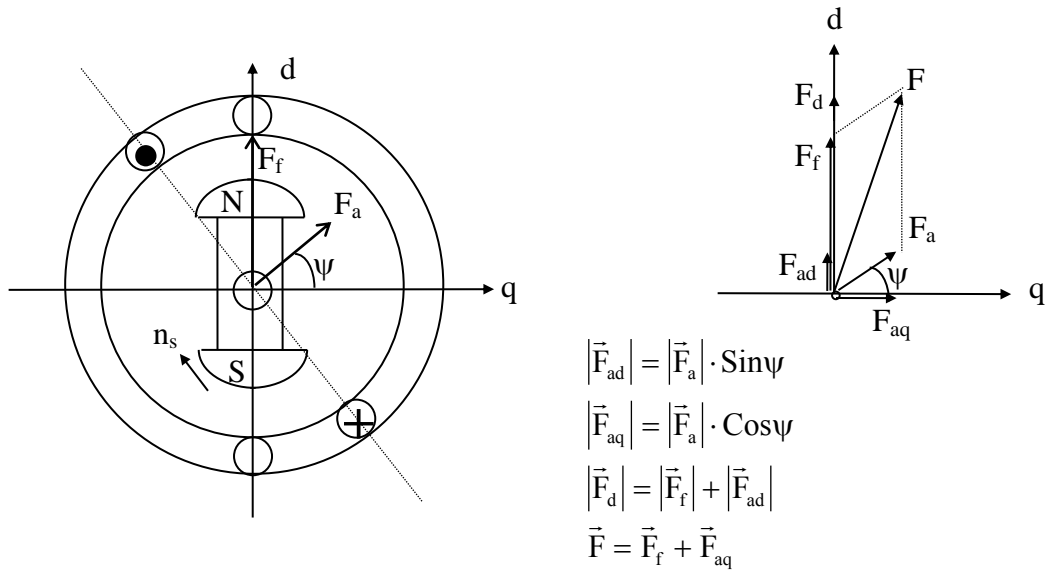
Şekil 8.5 Kapasitif yüklü senkron generatörde endüvi reaksiyonu

Endüklenen emk d ekseninde maksimum olurken akım (dönüş yönüne göre) akım ψ açısı kadar önce maksimum değerini alır. Bunun neticesinde, kapasitif yüklü senkron generatörde endüvi alanının dikey boyuna bileşeni F_{ad} , F_f 'yi destekleyerek kuvvetlendirir (Şekil 8.5). Böylelikle, generatör terminal gerilimi artar.

8.2. Motor İşletmesi

Motor işletmesi için endüvi reaksiyonu kolayca geliştirilebilir. Motorda akım yönü, generatöre göre zıt yönde olacaktır. Endüktif motor işletmesini alarak incelemeyi sürdürelim.

Şekil 8.6'dan görüleceği üzere endüktif karakterli motor akımının oluşturduğu endüvi reaksiyonu esas alanı desteklemekte ve dolayısı ile F_f 'yi arttırıcı etki oluşturmaktadır. Endüktif motor işletmesindeki reaksiyon kapasitif generatördeki reaksiyona benzer olup, destekleme vardır.



Şekil 8.6 Endüktif çalışan senkron motorda endüvi reaksiyonu

Kolayca gösterilebilir ki, kapasitif motor işletmesindeki reaksiyon, endüktif generatör işletmesindeki endüvi reaksiyonuna benzer olup, şiddetle zayıflatıcı etkiye sahiptir. Omik motordaki durum ise omik generatördeki ile aynıdır (Hafif zayıflama).

9. SENKRON MAKİNANIN EŞDEĞER DEVRESİ

9.1. Endüvi Sargılarında Endüklenen EMK

Endüvi sargılarında endüklenen gerilim kolayca gösterilebilir ki; $E = B \cdot \ell \cdot v$ (Biot-Savart Yasası) hareket geriliminden elde edilip, netice itibariyle asenkron makinalardaki ifadenin benzeridir (Eşitlik 3.1):

$$E_{fe} = 4.44 \cdot \phi_{emax} \cdot f_e \cdot N_a \cdot k_{wae} \quad (9.1)$$

Burada ; e : hava aralığı akısının harmonik numarası,

ϕ_{emax} : Hava aralığı akısının e . uzay harmoniğinin maksimum değeri ,

f_e : hava aralığı akısı e . harmonik bileşeninin frekansı,

N_a : Endüvinin bir fazındaki toplam sarım sayısı,

k_{wae} : e . endüvi sargısı harmoniği için, endüvi sargı faktörüdür.

9.1 nolu bağıntıdan görüleceği üzere, kutup tekerleğinin üreteceği bütün harmonik akılar (ϕ_e) endüvide E_{fe} gerilimi endükler. Kutup tekerleğinin üreteceği hava aralığı akısının sinüzoidalden sapması, endüvide endüklenen geriliminde sinüzoidalden sapmasına; harmonik içermesine neden olacaktır. Bu nedenle hava aralığı akısının olabildiğince sinüzoidale yakın olması sağlanmalıdır. Kutup akısının saf sinüzoidal olduğu kabul edilirse endüvide üretilen emk;

$$E_f = 4.44 \cdot \phi_{max} \cdot f_1 \cdot N_a \cdot k_{wa} \quad (9.2)$$

9.2. Yuvarlak Rotorlu Senkron Makinanın Eşdeğer Devresi

Daha önce bahsedildiği gibi, endüviye çok fazlı ve simetrik sargı yerleştirilmiştir. Bu sargılara uygulanan aynı faz sayısında ve uygun faz farklı gerilimler, makinanın faz sargılarından simetrik akımlar akıtırlar. Her ne kadar fazlarda bütün büyüklüklerin

birbirine eşit olduğu kabul edilse bile, makinanın elektromanyetik sistem olan yapısını elektriksel bir devre (eşdeğer devre) ile temsil etmek, makinanın performansının ve iç değişkenlerinin incelenmesinde büyük kolaylık sağlar. Ancak bu sayede makinaya ilişkin çözümler kolaylıkla elde edilir. Çok fazlı ve fazları simetrik olan bir makinanın bir fazının temsili ile eşdeğer devre elde edilir. Tüm hesaplar öncelikle bir faz için yapılır ve daha sonra çok fazlı sisteme geçilir.

Endüvi ile kutup tekerleği farklı iki sargı taşıdıkları gibi, bu sargılardan geçen akımlarda karakter yönüyle farklıdırlar. Böylece makinada iki değişik alan mevcuttur. Bu alanlar arasındaki ilişkiler endüvi reaksiyonunu doğurur. Böylelikle makinada bileşke bir alan söz konusu olur. O halde bu iki sargıyı ortak olarak kavrayan bu akı zincirlemesi ψ_a , endüviden geçen akım neticesinde ortaya çıktığı için bir öz endüktans tarif etmesi gerekir.

$$\psi_a = L_a \cdot I_1 \quad (9.3)$$

Ayrıca endüvi sargılarında dolaşan bu akım ; I_1 sargıların cephe bağlantılarında, oluklarda muhtelif yerlerde devresini karşı sargıyı kavramadan havadan kapayarak, endüvi ile kutup tekerleğinin manyetik olarak bağlanmasına katkıda bulunmayan kaçak akılar da oluşturur. Bu kaçak akıların da (ψ_σ) kendine özgü bir endüktansta oluşması gerekir.

$$\psi_\sigma = L_\sigma \cdot I_1 \quad (9.4)$$

O halde endüvinin bir fazının endüktansı (Senkron endüktans : L_s)

$$L_s = L_a + L_\sigma \quad (9.5)$$

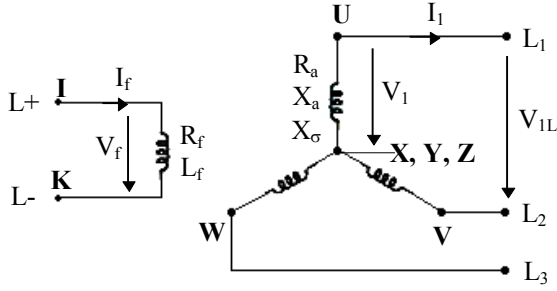
olur. Bu endüktans, açısal hız ile beraber bir reaktans tanımlar. Buna senkron reaktans denir:

$$X_s = \omega \cdot L_s = \omega \cdot L_a + \omega \cdot L_\sigma = X_a + X_\sigma \quad (9.6)$$

İki bileşenden oluşan senkron reaktansın küçük kısmına X_σ ; kaçak reaktans, büyük kısmına ise X_a ile gösterilen endüvi reaksiyonu reaktansı denir.

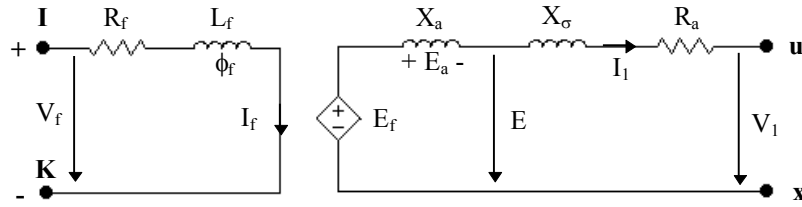
Sargının omik direnci “ R_a ” da hesaba katılmalıdır.

Üç fazlı bir makinada, kutup sargısı ve endüvi sargılarını Şekil 9.1'deki gibi temsil edebiliriz.



Şekil 9.1 Üç fazlı senkron makinanın sargıları, uçları ve parametreleri

Bu devrenin bir fazının temsili, senkron makinanın eşdeğer devresini verir.



Şekil 9.2 Yuvarlak rotorlu senkron generatörün eşdeğer devresi (motor işletmesi için endüvi akımı yön değiştirir)

E_a 'nın yönü omik ve endüktif çalışma için Şekil 9.2'deki gibidir. Kapasitif yükte ise polarite değiştirir.

Şekil 9.2'de E_f bağımlı kaynağının değeri Eşitlik 9.2'de verilmiştir. $E_a = j \cdot X_a \cdot I_1$ değeri gerilim düşümü değil, yönü yükün faz açısına bağlı olarak değişen (E_f 'ye göre) endüklenen bir gerilimdir. Şekil 9.2'de;

E_a 'ya endüvi reaksiyonu gerilimi,

E_f 'ye boşa endüklenen gerilim,

E 'ye yükte endüklenen gerilim,

V_1 'e ise bir faz sargısının terminal gerilim denir.

Generatör çalışma hali için çizilen Şekil 9.2'deki eşdeğer devrede oluşturulacak Kirchoff çevrelerinden ;

$$\dot{E} = \dot{E}_f - \dot{E}_a \quad (9.7a)$$

$$\dot{E} = \dot{I}_1 \cdot R_a + j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_\sigma + \dot{V}_1 \quad (9.7b)$$

yazılır. Generatör çalışma durumuna tekabül eden bu devrede ;

$$\dot{I}_1 (R_a + j \cdot X_\sigma) \quad (9.8)$$

bileşeni makinanın bir fazındaki gerilim düşümünü verir. Endüvi reaksiyonu gerilimi;

$$\dot{E}_a = j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_a \quad (9.9)$$

Eşitlik 9.7a,b'de yazılırsa;

$$\dot{E}_f = \dot{V}_1 + \dot{I}_1 \cdot (R_a + j \cdot X_\sigma + j \cdot X_a) \quad (9.10a)$$

haline gelir. Bu ifadede $X_\sigma + X_a = X_s$ olarak kısaltılırsa (Eşitlik 9.6);

$$\dot{E}_f = \dot{V}_1 + \dot{I}_1 \cdot (R_a + j \cdot X_s) \quad (9.10b)$$

olur.

Motor çalışma durumunda ise akım yönü ters olduğu için ;

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_f + \dot{I}_1 \cdot (R_a + j \cdot X_\sigma + j \cdot X_a) \quad (9.11a)$$

yada;

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_f + \dot{I}_1 \cdot (R_a + j \cdot X_s) \quad (9.11b)$$

elde edilir. Bu ifadenin her iki yanı “ \dot{I}_1 ” ile çarpılıp reel kısımlar alınır ;

$$P_e = \text{Reel} (\dot{V}_1 \cdot \dot{I}_1^*) \quad (9.12)$$

giriş elektrik gücü,

$$P_{mi} = \text{Reel} (\dot{E}_f \cdot \dot{I}_1^*) \quad (9.13)$$

endüklenen mekanik gücü,

$$P_{cua} = \text{Reel} ((\dot{I}_1^2 \cdot (R_a + j \cdot X_s))) \quad (9.14)$$

Endüvi sargısındaki bakır kaybını verir. Uyarma sargısındaki bakır kaybı ise;

$$P_{\text{cuf}} = I_f^2 \cdot R_f \quad (9.15)$$

olur. Bilindiği üzere alternatif akımda büyüklükler fazörsel büyüklükler olup, içlerinde açılarını da barındırırlar. \dot{V}_1 referans fazör alınır ;

$$\dot{V}_1 = V_1 \angle 0 \quad (9.16)$$

$$\dot{I}_1 = I_1 \angle \varphi \quad (9.17)$$

$$\dot{E}_f = E_f \angle \delta \quad (9.18)$$

yazılır. O halde 9.11 ifadesi kutupsal koordinatlarda;

$$E_f \angle \delta = V_1 + I_1 \angle \varphi \cdot (R_a + j \cdot X_s) \quad (9.19)$$

olur. Burada akım endüktif karakterli ise, $\varphi < 0$ olacağı unutulmamalıdır.

9.3. Yuvarlak Rotorlu Senkron Makinanın Fazör Diyagramları

Makinanın hangi işletme durumu olursa olsun fazör diyagramını çizmek için eşdeğer devrede (Şekil 9.2) belirtilen büyüklüklerden faydalanmak gerekir. Bu nedenle bazı ölçümlerin yapılması gerekir. Yapılması gereken ölçümler şunlardır :

- 1 – Kutup gerilimi veya şebeke geriliminin voltmetre ile ölçülmesi ve bir faz sargısının geriliminin elde edilmesi (V_1),
 - 2 – Şebekeye verilen yada alınan I_1 akımının ampermetre ile ölçülmesi
 - 3 – \dot{I}_1 ile \dot{V}_1 arasındaki φ faz farkının vatmetreler ile ;
- tek fazlı güç ölçümü yapıldı ise (P_{e1} ; bir faz akımı ve faz-nötr gerilimi üzerinden yapılan güç ölçümü olmak üzere);

$$\varphi = \arccos \left(\frac{P_{e1}}{V_1 \cdot I_1} \right) \quad (9.20a)$$

ile, eğer iki vatmetre kullanılıp 3 fazlı güç ölçülürse (Aron montajı);

$$\varphi = \arccos \left[\frac{(P_1 + P_2)}{\sqrt{3} \cdot V_{1L} \cdot I_{1L}} \right] \quad (9.20b)$$

olur. Burada P_1 ve P_2 Aron bağlı vatmetrelerin ölçtükleri güçlerdir.

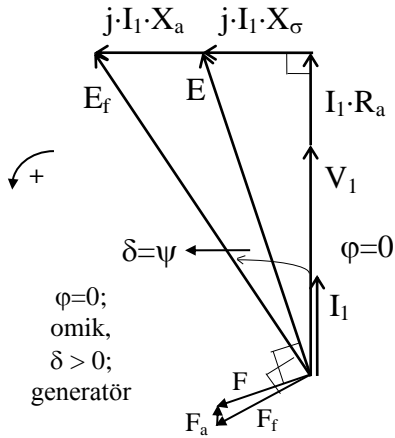
- 4 – Bir faza ait omik direnç; sargıya doğru akım verilerek, ampermetre-voltmetre (önce bağlama) ile belirlenir.

5 – X_σ kaçak reaktansı ve X_a endüvi reaksiyonunun reaktansının bilindiği kabul edilirse (daha sonra bahsedilecektir) omik, endüktif ve kapasitif çalışan generatörün fazör diyagramları aşağıdaki gibi çizilir.

9.3.1. Generatör işletmesi

9.10a nolu eşitlikte; $\dot{E}_f = \dot{V}_1 + \dot{I}_1 \cdot R_a + \dot{I}_1 \cdot j \cdot X_\sigma + \dot{I}_1 \cdot j \cdot X_a$, \dot{V}_1 referans alınıp, buna paralel ($\varphi=0$) \dot{I}_1 fazörü çizilir. Daha sonra yukarıdaki eşitlik gereği $\dot{I}_1 \cdot R_a$, $j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_\sigma$ ve $j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_a$ gerilimleri \dot{V}_1 'e ilave edilerek \dot{E}_f elde edilir. j çarpanı fazörü 90° ileri atmaktadır. Dolayısıyla $j \cdot \dot{I}_1 \perp \dot{I}_1$ olur.

9.3.1.1. Omik çalışan generatör



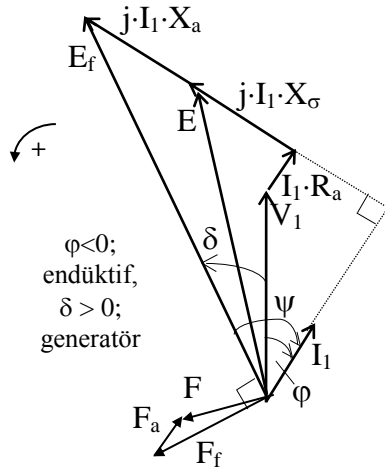
$\varphi \angle \dot{V}_1, \dot{I}_1$; güç açısı,
 $\psi \angle \dot{E}_f, \dot{I}_1$; iç güç açısı,
 $\delta \angle \dot{V}_1, \dot{E}_f$; yük açısı,
 E_f boşa endüklenen emk,
 E yükte endüklenen emk,
 V_1 ; bir faz sargısı terminallerindeki gerilim,
 I_1 ; bir faz sargısı akımı,
 $\dot{E}_a \perp \dot{I}_1$,
 $\dot{E}_f \perp \dot{E}_f$.

$|E| < |E_f|$ endüvi reaksiyonu kutup alanın zayıflatıcı etki yapıyor.

Şekil 9.3 Omik çalışan senkron generatörün fazör diyagramları (gerilim ve mmk fazörleri)

9.3.1.2. Endüktif çalışan generatör

$\varphi < 0$ olduğu göz önüne alınıp omik fazör diyagramındaki gibi çizilir (Şekil 9.4).

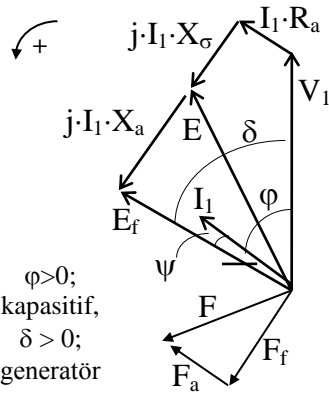


$$|F| < |F_f|$$

$$|E| < |E_f| \quad \text{endüvi reaksiyonu kutup alanın kuvvetle zayıflatıcı etki yapıyor}$$

Şekil 9.4 Endüktif çalışan senkron generatörün fazör diyagramları (gerilim ve mmk fazörleri)

9.3.1.3. Kapasitif çalışan generatör



$$|F| > |F_f|$$

$$|E| > |E_f| \quad \text{endüvi reaksiyonu kutup alanını arttırıcı etki yapıyor}$$

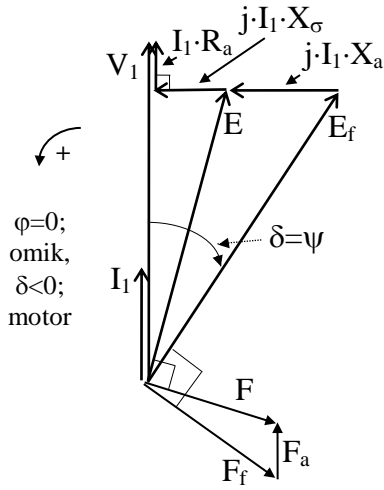
Şekil 9.5 Kapasitif çalışan senkron generatörün fazör diyagramları (gerilim ve mmk fazörleri)

9.3.2. Motor işletmesi

9.11a nolu eşitliği; $\dot{V}_1 = \dot{E}_f + \dot{I}_1 \cdot R_a + \dot{I}_1 \cdot j \cdot X_\sigma + \dot{I}_1 \cdot j \cdot X_a$ şeklinde açıp, \dot{V}_1 referans alınarak, $\dot{I}_1 \cdot R_a$, $j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_\sigma$ ve $j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_a$ gerilimleri \dot{V}_1 'den çıkartılarak \dot{E}_f elde edilir.

9.3.2.1. Omik çalışan motor

Şimdi $\varphi=0$ alarak yukarıda bahsedilen adımları uygulayalım (bkz Şekil 9.6).

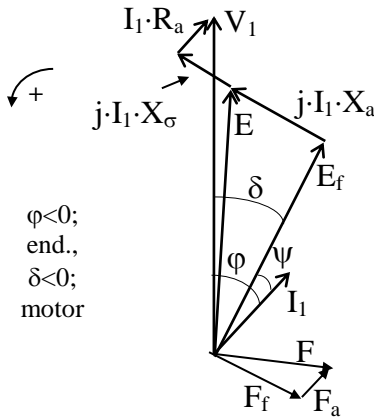


$|F| < |F_f|$
 $|E| < |E_f|$ endüvi reaksiyonu kutup alanını
 zayıflatıcı etki yapıyor

Şekil 9.6 Omik çalışan motorun fazör diyagramları (gerilim ve mmk fazörleri)

9.3.2.2. Endüktif çalışan motor

Şimdi $\varphi<0$ alarak yukarıda bahsedilen adımları uygularsak Şekil 9.7’de görülen fazör diyagram elde edilir.



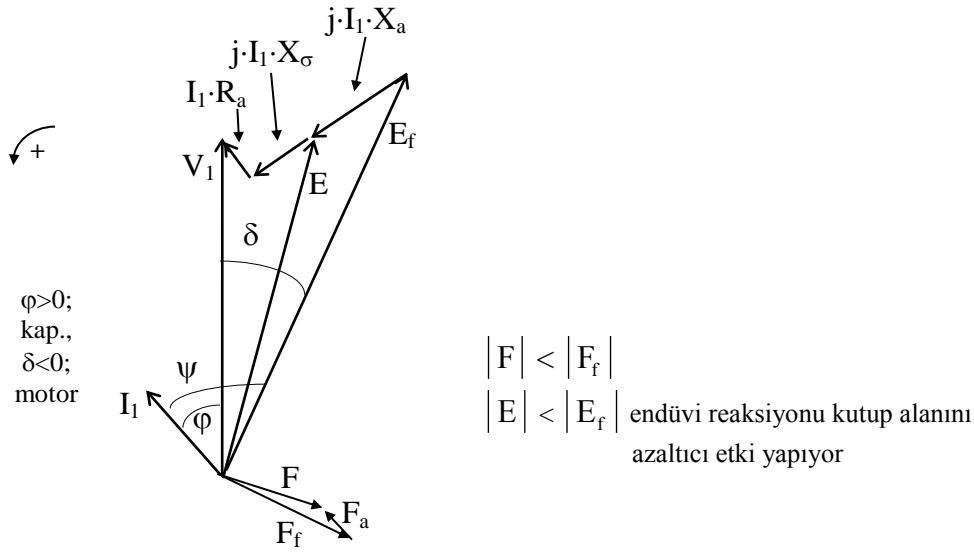
$|F| > |F_f|$
 $|E| > |E_f|$ endüvi reaksiyonu kutup alanını
 arttırıcı etki yapıyor

Şekil 9.7 Endüktif çalışan motorun fazör diyagramları (gerilim ve mmk fazörleri)

Endüktif çalışan motordaki endüvi reaksiyonunun etkisi, kapasitif generatördeki benzer olarak cereyan eder ve kutup alanını arttırıcı yöndedir.

9.3.2.3. Kapasitif çalışan motor

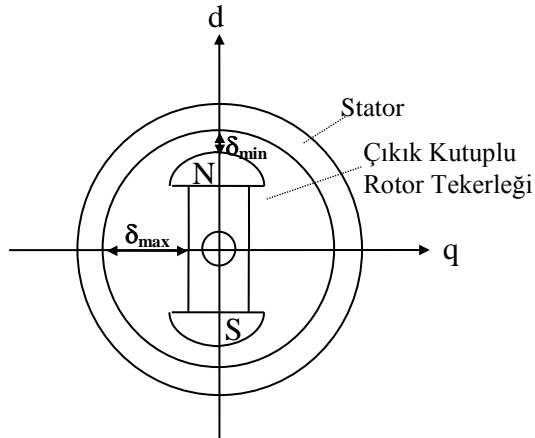
Şimdi $\varphi>0$ alarak yukarıda bahsedilen adımları uygularsak Şekil 9.8’de görülen fazör diyagram elde edilir.



Şekil 9.8 Kapasitif çalışan motorun fazör diyagramları (gerilim ve mmk fazörleri)

Kapasitif çalışan motordaki endüvi reaksiyonunun etkisi, endüktif generatördekine benzer olarak cereyan eder ve kutup alanını azaltıcı yöndedir.

9.4. Çıkık Kutuplu Senkron Makinanın Eşdeğer Devresi ve Denklemleri



Şekil 9.9 Çıkık kutuplu makinada hava aralığı farklılıkları

Kutup tekerleği ile endüvi arasındaki hava aralığı d ekseninde minimum; δ_{min} (burada δ hava aralığını göstermektedir), q ekseninde ise maksimum; δ_{max} 'dır. Dolayısı ile d eksenindeki manyetik direnç \mathcal{R}_d minimum, ψ_d akısı ise maksimum olur. Diğer taraftan q eksenindeki hava boşluğu (δ_{max}) maksimum olduğundan manyetik direnç de maksimum (\mathcal{R}_q), ψ_q akısı da minimum olur.

$\psi = L \cdot I$ temel bağıntısından $L = \frac{\psi}{I}$ olur.

Bilindiği üzere, ψ büyük olduğunda L ve açısal hızda göz önüne alındığında $X = \omega \cdot L$ reaktansı büyük olacak, makina sabit bir gerilim üretiyorsa (yada sabit bir gerilime beslenmiş ise) sargılarından minimum akım geçecektir. Aksi halde, yani ψ küçük olduğunda ise L ve X küçük olacak, dolayısı ile sargıdan geçen akım önceki duruma göre büyük olacaktır.

Bu ilişkiler neticesinde ; senkron makinanın boyuna ekseninde büyük olan ψ_d bobin akısı, bunun tanımlayacağı büyük reaktans ve küçük akım da ;

$$L_{ad} = \frac{\psi_{ad}}{I_{ld}} , \quad X_{ad} = \omega \cdot L_{ad} \quad (9.21)$$

ifadelerini tanımlar. Daha küçük olan enine eksen akısı; ψ_{aq} ve onun neden olacağı küçük reaktans ve büyük akımdan ;

$$L_{aq} = \frac{\psi_{aq}}{I_{lq}} , \quad X_{aq} = \omega \cdot L_{aq} \quad (9.22)$$

ifadeleri elde edilir. 9.21 ve 9.22 İfadelerinde farklı eksenler için oluşacak X_{ad} , X_{aq} endüvi reaksiyonu reaktansları, ilgili akımlar ile birlikte endüvi reaksiyonu gerilimlerini (farklı eksenlerde; elektriksel olarak 90° faz farklı) oluşturur. Bu gerilimler:

$$E_{aq} = j \cdot I_{lq} \cdot X_{aq} \quad (9.23)$$

$$E_{ad} = j \cdot I_{ld} \cdot X_{ad} \quad (9.24)$$

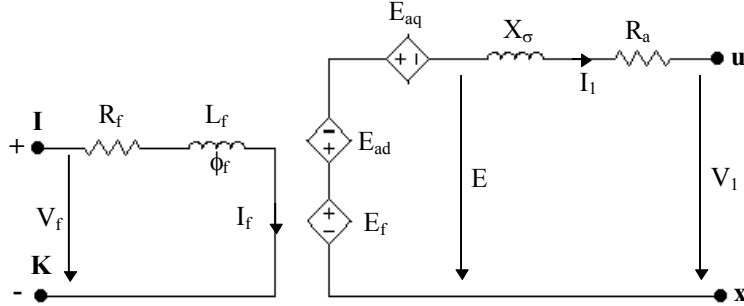
olur. Yukarıdaki reaktanslar farklı eksenler için aynı sargıda olduğundan, X_σ kaçak reaktansı da bu reaktanslara ilave edilirse:

$$X_q = X_{aq} + X_\sigma \quad (9.25)$$

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma \quad (9.26)$$

olarak tanımlanabilir.

Şimdi 9.23 ve 9.24'den elde edilen endüvi reaksiyonu gerilimlerini değerlendirerek, Şekil 9.2'de verilen yuvarlak kutuplu makinanın eşdeğer devresini çıkık kutuplu senkron makina için düzenleyelim (Şekil 9.10).



Şekil 9.10 Çıkık kutuplu senkron makinanın eşdeğer devresi

Şekil 9.10'daki E_f , E_{aq} ve E_{ad} , bağımlı gerilim kaynaklarının değerleri sırası ile 9.2, 9.23 ve 9.24 nolu bağıntılarda belirtilmiştir. Bu bağıntıların birleştirilmesi ve Şekil 9.10'dan yazılacak Kichoff çevre denkleminde ;

Generatör çalışma için:

$$\dot{E}_f = \dot{V}_1 + \dot{I}_1 \cdot R_a + j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_\sigma + j \cdot I_{1q} \cdot X_{aq} + j \cdot I_{1d} \cdot X_{ad} \quad (9.27a)$$

veya 9.25 ve 9.26 ifadelerinin de katkılanması ile;

$$\dot{E}_f = \dot{V}_1 + \dot{I}_1 \cdot R_a + j \cdot (I_{1q} \cdot X_q + I_{1d} \cdot X_d) \quad (9.27b)$$

Motor çalışma için (akımın yön değiştirdiği gerçeği ile):

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_f + \dot{I}_1 \cdot R_a + j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_\sigma + j \cdot I_{1q} \cdot X_{aq} + j \cdot I_{1d} \cdot X_{ad} \quad (9.28a)$$

veya yine 9.25 ve 9.26 ifadelerinin de katkılanması ile;

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_f + \dot{I}_1 \cdot R_a + j \cdot (I_{1q} \cdot X_q + I_{1d} \cdot X_d) \quad (9.28b)$$

ifadeleri elde edilir.

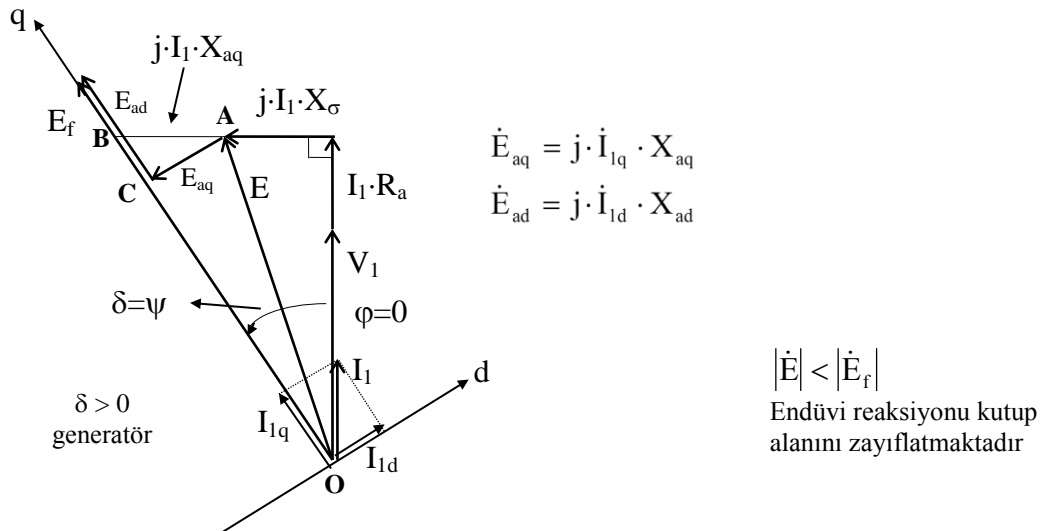
9.5. Çıkık Kutuplu Senkron Makinanın Fazör Diyagramı

9.27a ve 9.28a nolu ifadelerden yola çıkarak, V_1 'i referans alıp \dot{V}_1 , $\dot{I}_1 \cdot R_a$ ve $j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_\sigma$ fazörleri yuvarlak kutuplu makinada olduğu gibi çizilir ve \dot{E} (yükte endüklenen emk) fazörü elde edilir (Şekil 9.11 - A noktası). A noktasına $j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_{aq}$ fazörü ilave edilir ve B noktası bulunur. \overline{OB} yönü; q eksenini, buna dik eksen ise d eksenini verir. Daha sonra, \dot{I}_1 akımının bu eksenlerdeki iz düşümleri olan I_{1q} ve I_{1d} bileşenleri elde edilip ; $\dot{E}_{aq} = j \cdot \dot{I}_{1q} \cdot X_{aq}$ ve $\dot{E}_{ad} = j \cdot \dot{I}_{1d} \cdot X_{ad}$ endüvi reaksiyonu gerilimleri hesaplanılıp çizildikten sonra \dot{E}_f fazörü elde edilir. Ayrıca A noktasından q eksenine çizilen dikme; \overline{AC} , pratik olarak \dot{E}_{aq} 'yu vermektedir.

9.5.1. Çıkık Kutuplu Generatörün Fazör Diyagramları

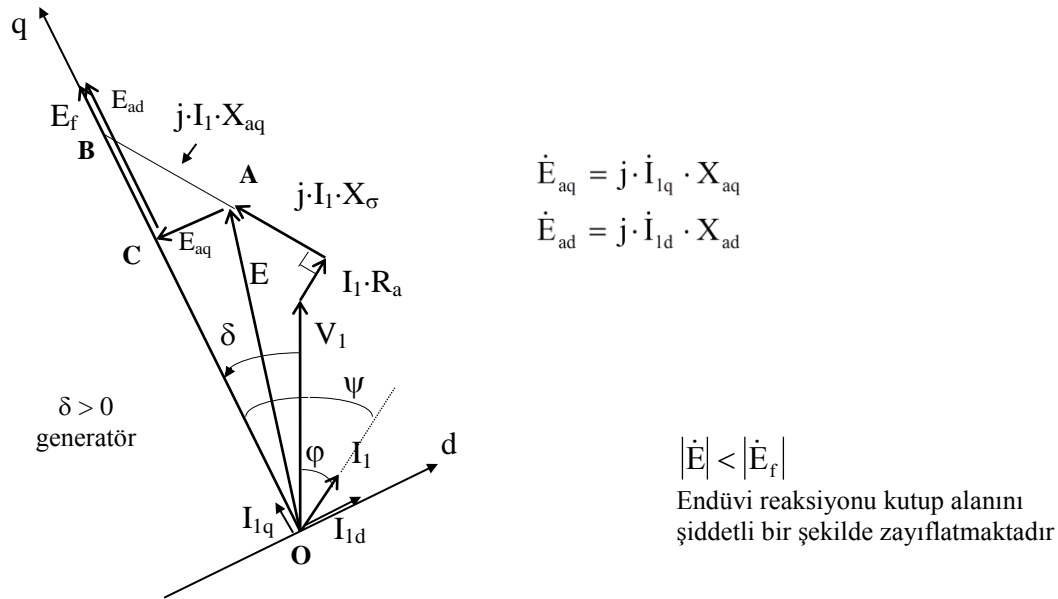
Yukarıdaki açıklamalar izlenilerek, \dot{V}_1 fazörü referans alınıp, 9.27a nolu ifade sağlanacak şekilde fazör diyagramlar elde edilir.

9.5.1.1. Omik çalışan generatör



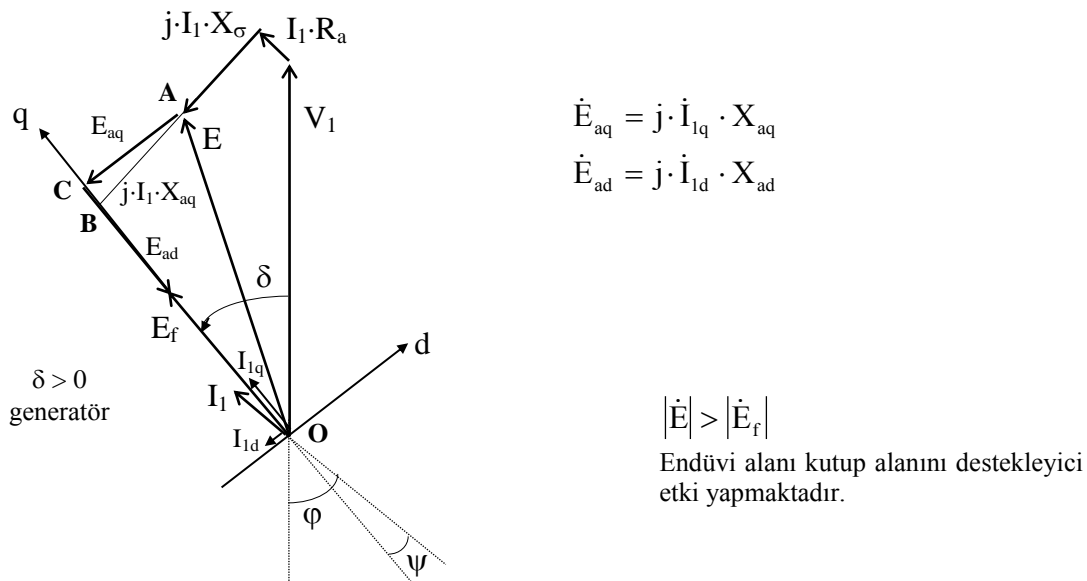
Şekil 9.11 Omik çalışan çıkık kutuplu senkron generatörün fazör diyagramı

9.5.1.2. Endüktif çalışan generatör



Şekil 9.12 Endüktif çalışan çıkık kutuplu senkron generatörün fazör diyagramı

9.5.1.3. Kapasitif çalışan generatör



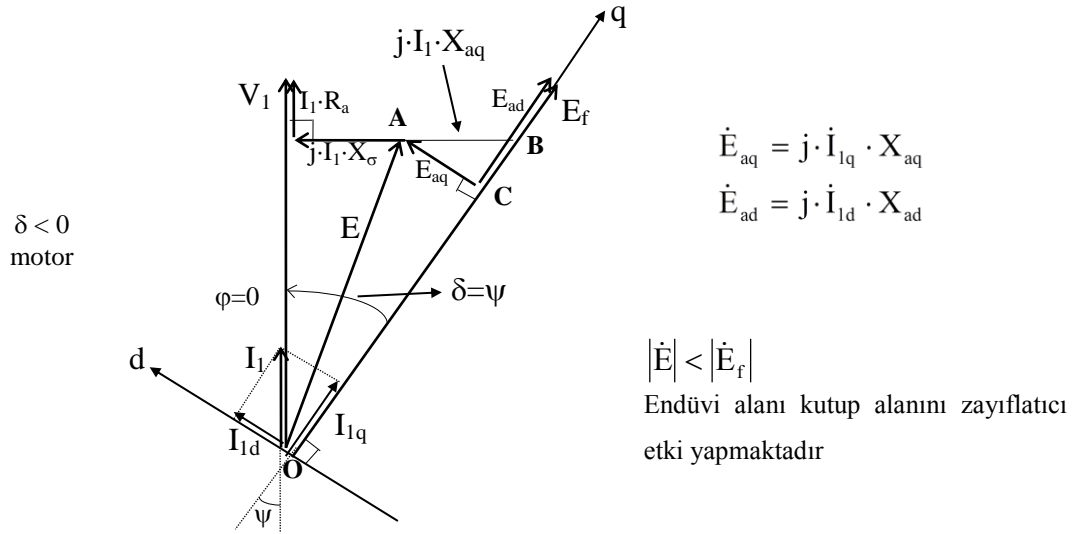
Şekil 9.13 Kapasitif çalışan çıkık kutuplu senkron generatörün fazör diyagramı

Kapasitif çalışan çıkık kutuplu generatörde, yuvarlak kutupluda olduğu gibi, endüvi reaksiyonu d eksenini kuvvetlendirdiğinden dolayı yükte endüklenen emk kuvvetlice artmaktadır.

9.5.2. Çıkık kutuplu senkron motorun fazör diyagramları

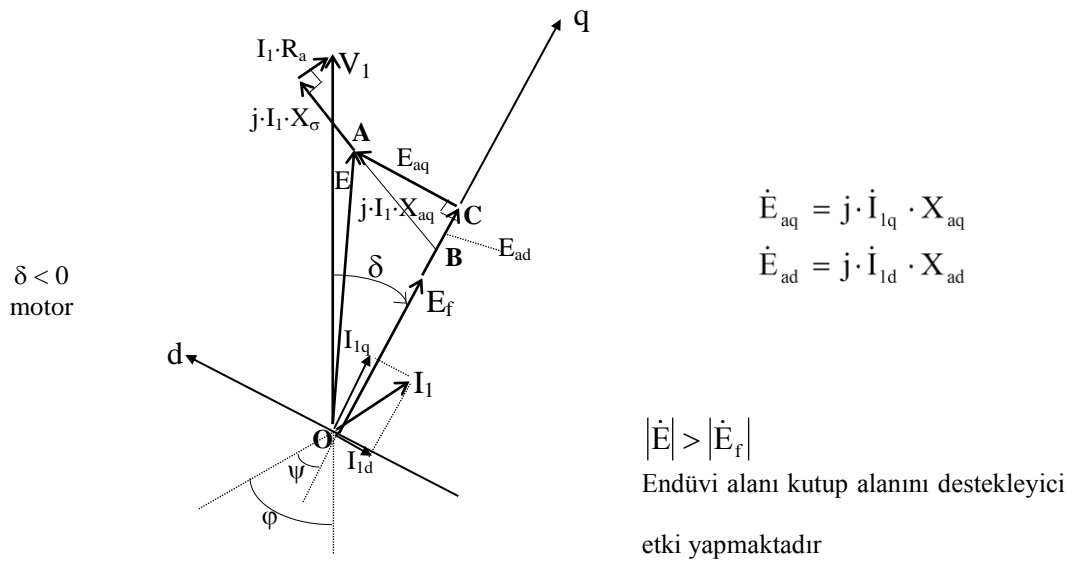
9.5 Bahsinde izah edildiği gibi, \dot{V}_1 fazörü referans alınıp, 9.28a nolu ifade sağlanacak şekilde fazör diyagramlar elde edilir

9.5.2.1. Omik çalışan motor



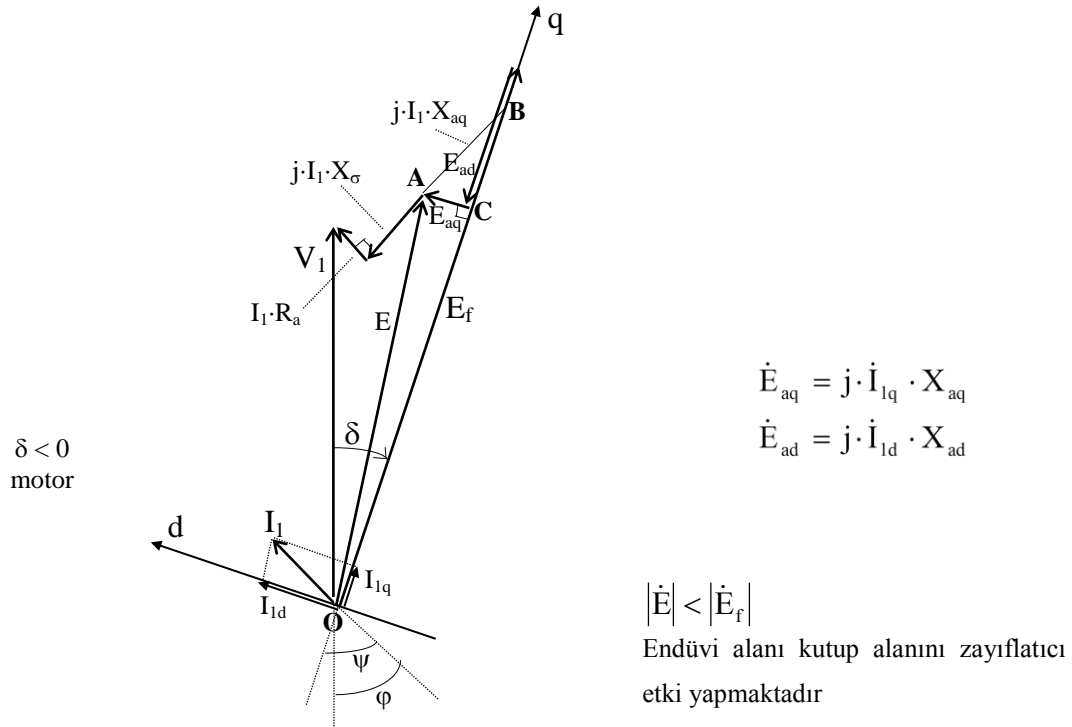
Şekil 9.14 Omik çalışan çıkık kutuplu senkron motorun fazör diyagramları

9.5.2.2. Endüktif çalışan motor



Şekil 9.15 Endüktif çalışan çıkık kutuplu senkron motorun fazör diyagramları

9.5.2.3. Kapasitif çalışan motor



Şekil 9.16 Kapasitif çalışan çıkık kutuplu senkron motorun fazör diyagramları

10. ENDÜVİ REAKSİYONU REAKTANSININ ANALİTİK OLARAK BULUNMASI

10.1. Yuvarlak Rotorlu Makinada 'X_a 'Endüvi Reaksiyonu Reaktansının Bulunması

Burada X_a endüvi reaksiyonu reaktansı asenkron makinalardaki mıknatıslanma reaktansı (X_m) ile tamamen özdeştir. Daha önce Bölüm 4.6'da detaylı olarak bahsedildiği için burada sadece eşitliği verilecektir:

$$X_a = \frac{2 \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot D \cdot \ell}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \cdot \left(\frac{N_a \cdot k_{wal}}{p} \right)^2 \quad (10.1)$$

Burada;

D = İçten içe endüvi çapı

ℓ = Etkin endüvi uzunluğu

δ = Kutup tekerleği ile endüvi arasındaki minimum açıklık

k_δ = hava aralığı düzeltme faktörü (1,1 ~ 1,2)

k_μ = Doyma faktörü (1 - 1,2)

N_a = Endüvi faz sargısı sarım sayısı

k_{wal} = Endüvi faz sargısı sargı faktörünün temel frekans bileşeni için değeri

m₁ = Endüvi sargısı faz sayısı

f₁ = Endüvi temel frekansı

p = Çift kutup sayısı

Daha sonra Senkron Genaratör karakteristikleri bahsinde X_a 'nın ve X_σ 'nın deneysel elde edilmesi verilecektir. X_σ 'nın analitik hesabı oldukça karmaşık bir konu olduğundan burada değinilmeyecektir.

10.2. Çıkık Kutuplu Makinada (X_{aq} ve X_{ad}) Enine ve Boyuna Endüvi Reaktanslarının Hesabı

Çıkık kutuplu makinada q ve d eksenlerindeki manyetik endüksiyonlar ve akılar farklı olduğundan X_a (yuvarlak kutuplu senkron makinadan); q ve d eksenlerinde farklı değerler alıp, iki bileşene; X_{aq} ve X_{ad} 'ye ayrılır.

Endüvinin d ekseninde ürettiği manyetik endüksiyon B_{ad} , ve bu sinüsoidalden farklı B_{ad} dağılımının temel bileşeni; B_{ad1} olursa d eksen endüvi reaksiyonu şekil faktörü :

$$k_{fd} = \frac{B_{ad1}}{B_{ad}} < 1 \quad (10.2)$$

Olarak tanımlanabilir. diğer taraftan endüvinin q ekseninde ürettiği endüksiyon B_{aq} , ve bu sinüsoidalden farklı B_{aq} dağılımının temel bileşeni B_{aq1} olursa, q eksen endüvi reaksiyonu şekil faktörü :

$$k_{fq} = \frac{B_{aq1}}{B_{aq}} < 1 \quad (10.3)$$

Olarak tanımlanabilir. Burada B_{ad1} , B_{ad} , B_{aq1} ve B_{aq} maksimum değerlerdir. Bu tanımlardan sonra Eşitlik 10.1'e benzer olarak:

$$X_a = \frac{2 \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot D \cdot \ell}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \cdot \left(\frac{N_a \cdot k_{wa1}}{p} \right)^2 \cdot k_{fd} \quad (10.4a)$$

ve

$$X_a = \frac{2 \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot D \cdot \ell}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \cdot \left(\frac{N_a \cdot k_{wa1}}{p} \right)^2 \cdot k_{fd} \quad (10.4b)$$

olur.

Daha sonra senkron generatör karakteristikleri konusunda X_{ad} , X_{aq} ve X_σ 'nın deneysel elde edilmesi verilecektir. X_σ 'nın analitik hesabı oldukça karışık olduğu için burada değinilmemiştir.

11. SENKRON MAKİNADA ENDÜKLENEN GÜÇ VE MOMENT

11.1. Yuvarlak Rotorlu Senkron Makinada Güç ve Moment

Makinada bir faz başına dış güç;

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (11.1a)$$

3 fazlı makina için ise;

$$P = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_{LL} \cdot \cos\varphi \quad (11.1b)$$

Bir faz için endüklenen güç (döner alan gücü) ise diğer elektrik makinalarında olduğu gibi;

$$P_{d1} = E_f \cdot I_1 \cdot \cos\psi \quad \psi \angle \dot{E}_f, \dot{I}_1 \quad (11.2a)$$

3 faz için ise;

$$P_d = 3 \cdot E_f \cdot I_1 \cdot \cos\psi \quad (11.2b)$$

olur.

Burada ψ ve E_f ; ölçülmesi güç büyüklüklerdir. Bu bağıntıyı daha kullanışlı hale getirmek için endüvi omik direncini ($r \cong 0$) sıfır kabul edip, endüktif çalışan genaratörün fazör diyagramını ele alalım:

$$X_s = X_a + X_\sigma$$

$$|AB| = |CD|$$

$$I_1 \cdot X_s \cdot \cos\psi = V_1 \cdot \sin\delta$$

$$I_1 \cdot \cos\psi = \frac{V_1 \cdot \sin\delta}{X_s} \text{ olur. Bu ifade Eşitlik 11.2b'de yerine}$$

yazılırsa, 3 fazlı makina için döner alan gücü yada endüklenen güç;

$$P_d = \frac{3 \cdot V_1 \cdot E_f \cdot \sin\delta}{X_s} \quad (11.3)$$

olarak elde edilir. Burada güç, yük açısı δ 'nın fonksiyonu olarak ortaya çıkar.

Endüklenen moment ise endüklenen gücün açısal hıza oranıdır:

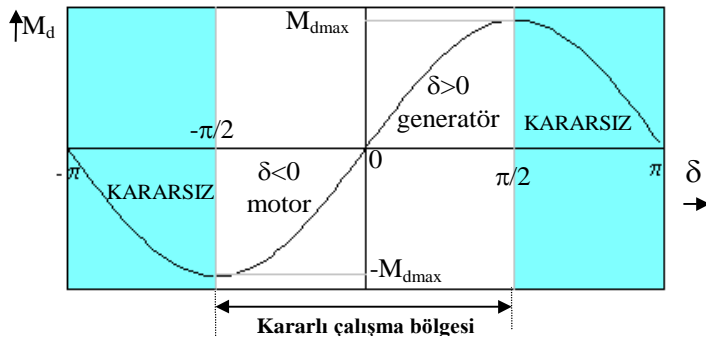
$$M_d = \frac{P_d}{\omega_s}, \quad \omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_s}{60}, \quad n_s = \frac{60 \cdot f_l}{p} \quad (11.4 \text{ a, b, c})$$

olup, yuvarlak rotorlu 3 fazlı senkron makinada endüklenen moment ;

$$M_d = \frac{3 \cdot V_l \cdot E_f}{X_s \cdot \omega_s} \cdot \sin \delta \quad (11.5)$$

olur.

11.5 ifadesi δ 'nın fonksiyonu göre çizilirse ;



Şekil 11.1 Senkron makinan kararlı çalışma bölgeleri

δ , sıfırdan başlayarak arttıkça makinanın ürettiği moment sinüsoidal olarak artmakta ve $\delta = \frac{\pi}{2}$ olduğunda $M_d = M_{dmax}$ olmaktadır. Artan yükü karşılamak için δ mutlak değer olarak artmaya devam ederse, makinanın moment fonksiyon gereği azalacağından makina kararlı çalışamaz ve senkronizmadan çıkar.

11.2. Çıkık Kutuplu Senkron Makinada Güç ve Moment

$R_a \cong 0$, $X_\sigma \cong 0$ kabul edilirse, endüvi kayıpları yaklaşık olarak 0 olacak ve 3 faz için iç güç dış güce eşit olacaktır;

$$P_d = 3 \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos \varphi \quad (11.6)$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_{aq} &= j \cdot \dot{I}_{lq} \cdot X_{aq} \\ \dot{E}_{ad} &= j \cdot \dot{I}_{ld} \cdot X_{ad}\end{aligned}$$

Fazör diyagramdan $\phi = \psi - \delta$ yazılabilir. Bu eşitlik 11.6 ifadesinde yazılırsa:

$\cos(\psi - \delta)$ yerine açılımı yazılırsa;

olur. Şekil 11.2'den elde edilecek;

ifadeleri 11.7 ifadesinde yerine yazılırsa;

$$P_d = 3 \cdot V_1 (I_{lq} \cdot \cos\delta + I_{ld} \cdot \sin\delta) \quad (11.9)$$

olur. Şekil 11.2’deki fazör diyagramdan I_{lq} ve I_{ld} ‘yi gerilim ve reaktanslar cinsinden yazarsak;

$$|E_{ad}| = I_{ld} \cdot X_{ad} = E_f - V_1 \cdot \cos \delta \Rightarrow I_{ld} = \frac{E_f - V_1 \cdot \cos \delta}{X_{ad}} \quad (11.10)$$

$$\left| E_{aq} \right| = I_{1q} \cdot X_{aq} = V_1 \cdot \sin \delta \Rightarrow I_{1q} = \frac{V_1 \cdot \sin \delta}{X_{aq}} \quad (11.11)$$

11.10 ve 11.11 ifadeleri, Eşitlik 11.9'da yerine konursa;

$$P_d = \frac{3 \cdot V_1^2}{X_{aq}} \cdot \sin \delta \cdot \cos \delta + \frac{3 \cdot V_1}{X_{ad}} \cdot (E_f - V_1 \cdot \cos \delta) \cdot \sin \delta$$

$\cos \delta \cdot \sin \delta = \frac{\sin(2 \cdot \delta)}{2}$ özdeşliği kullanılırsa;

$$P_d = \frac{3 \cdot V_1^2}{X_{aq}} \cdot \frac{\sin(2 \cdot \delta)}{2} + \frac{3 \cdot V_1 \cdot E_f}{X_{ad}} \cdot \sin \delta - \frac{3 \cdot V_1^2}{X_{ad}} \cdot \frac{\sin(2 \cdot \delta)}{2}$$

$$P_d = \frac{3 \cdot V_1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_{aq}} - \frac{1}{X_{ad}} \right) \cdot \sin(2 \cdot \delta) + \frac{3 \cdot V_1 \cdot E_f}{X_{ad}} \cdot \sin \delta \quad (11.12)$$

Böylelikle endüklenen güç ifadesi bulunmuş olur. Şayet X_σ ihmal edilmez ise (39) ifadesinde X_{aq} yerine $X_q = X_{aq} + X_\sigma$ ve X_{ad} yerine $X_d = X_{ad} + X_\sigma$ yazılmalıdır.

Endüklenen Moment ise ;

$$M_d = \frac{P_d}{\omega_s} = \frac{P_d}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_s}{60}} \quad (11.13)$$

11.13 ifadesinde 11.12 eşitliği yazılırsa, moment ifadesi;

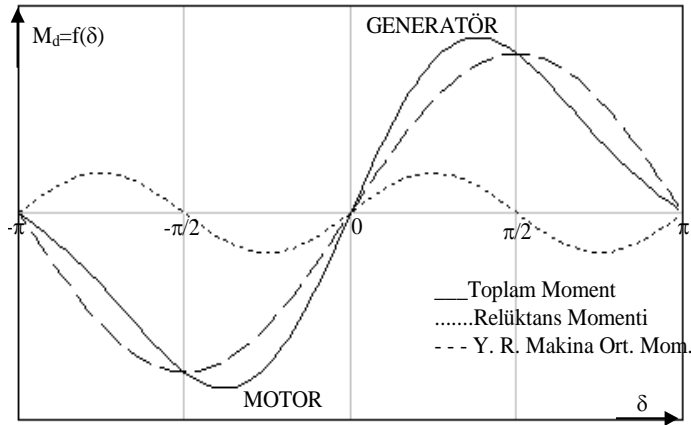
$$M_d = \underbrace{\frac{3 \cdot V_1^2}{4 \cdot \pi \cdot \frac{n_s}{60}} \cdot \left(\frac{1}{X_{aq}} - \frac{1}{X_{ad}} \right) \cdot \sin(2 \cdot \delta)}_{\text{Relüktans Momenti}} + \underbrace{\frac{3 \cdot V_1 \cdot E_f}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_s}{60} \cdot X_{ad}} \cdot \sin \delta}_{\text{Y. Rotorlu Makinanın ortalama Momenti}} \quad (11.14)$$

Relüktans momenti çıkık kutupluluktan dolayı oluşmaktadır. Çıkık kutupluluk olmadığında $X_{aq} = X_{ad}$ olacağından relüktans momenti sıfır olur.

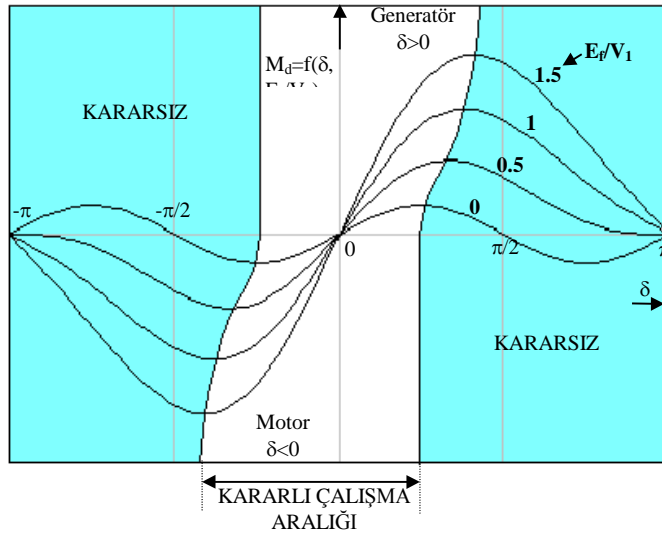
Şayet X_σ ihmal edilmez ise 11.14 ifadesi aşağıdaki gibi olur:

$$M_d = \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_s}{60}} \cdot \left[\frac{V_1 \cdot E_f}{X_d} \cdot \sin \delta + \frac{V_1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2 \cdot \delta) \right] \quad (11.15)$$

Momentin bileşenleri ayrı ayrı çizilirse;



Şekil 11.3 Çıkık kutuplu senkron makinada moment bileşenlerinin yük açısına göre değişimleri



Şekil 11.4 Çıkık kutuplu senkron makinada, E_f/V_1 oranına bağlı olarak karalı çalışma aralığının değişimi

Bu şekilde çıkık kutuplu makina aşırı uyarıldığı taktirde δ 'nın kararlı çalışma aralığı büyümekte üretilen momentin arttığı görülmektedir (Şekil 11.4). E_f 'nin doyumlulu olduğu göz ardı edilmemelidir. Diğer elektrik makinalarında da olduğu gibi, momentin manyetik akının fonksiyonu olduğu

$$E_f = f(\Phi), \Phi = f(i_f), E_f \cong k \cdot \Phi \Rightarrow M_d = 3 \cdot k \cdot \Phi \cdot I_1 \cdot \cos \Psi$$

ifadeleri ile gösterilebilir.

12. SENKRON GENERATÖR KARAKTERİSTİKLERİ

12.1. Giriş

Karakteristiklere geçmeden önce, güçleri çok büyük olan bu makinaların birbirleri ile mukayeselerini yapabilmek amacıyla PER - UNIT (birime indirgenmiş) değerler sisteminden söz etmek yerinde olur. Zira güç ve devir sayıları ve hatta gerilimleri çok farklı olan iki makina arasında mukayese elde etmek için karakteristiklerine bakmak gerekir. Ancak karakteristiklerde eksenler her ne kadar aynı büyüklükleri gösterse de, değerlerin farklı oluşu, mukayesenin sıhhatli olabilmesi için bir temele oturtulması icap eder. bu nedenle gerçek değerlerin nominal değerlere oranlanması sureti ile elde edilen birim ölçülere PER - UNIT değer tabir olunur. n indisi ile nominal ve 1 ile faz başına (yada sargı değerleri) gösterilirse:

Makina empedansı;

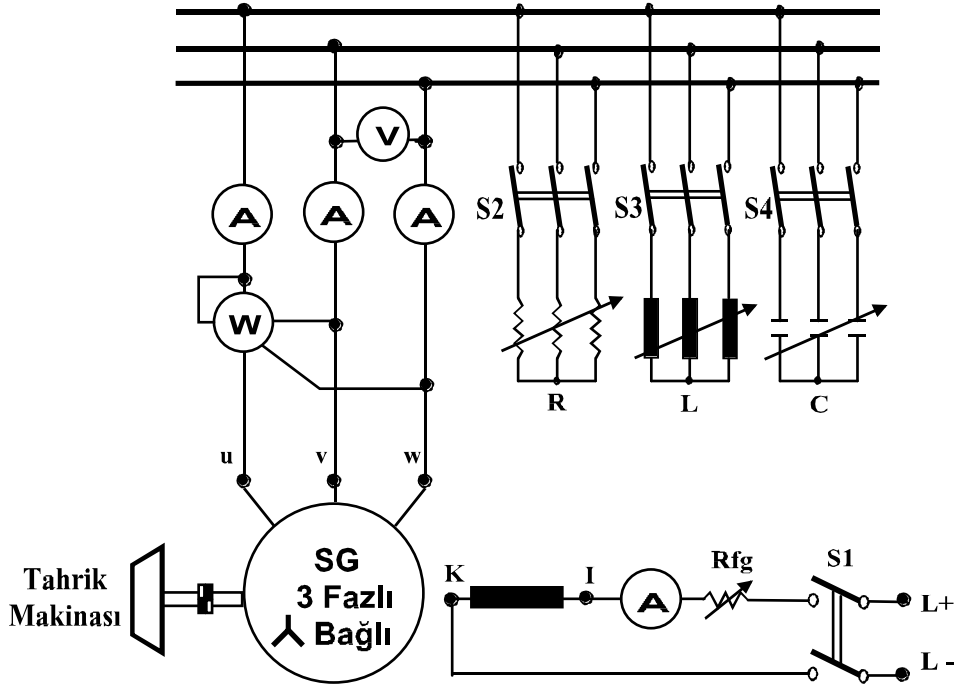
$$Z_{1n} = \frac{V_{1n}}{I_{1n}} = \frac{V_{1n}^2}{S_{1n}} \quad S_{1n} : \text{Bir fazın nominal görünür gücü} \quad (12.1)$$

PER - UNIT büyüklükler ;

$$I_{1pu} = \frac{I_1}{I_{1n}} \quad , \quad V_{1pu} = \frac{V_1}{V_{1n}} \quad , \quad S_{1pu} = \frac{S_1}{S_{1n}} \quad , \quad P_{1pu} = \frac{P_1}{P_{1n}} \quad (12.2-12.5)$$

$$Z_{1pu} = \frac{Z_1}{Z_{1n}} \quad , \quad R_{apu} = \frac{R_a}{Z_{1n}} \quad , \quad X_{spu} = \frac{X_s}{Z_{1n}} \quad (12.6-12.8)$$

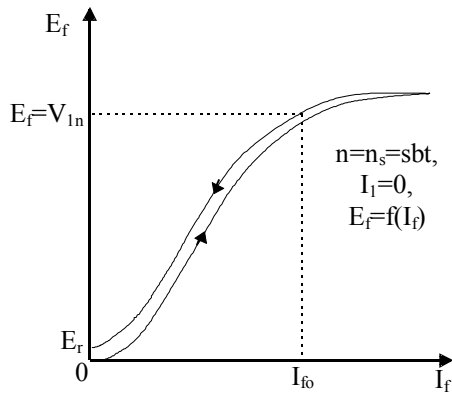
değerlerini alır. Bu değerler kullanılarak çizilmiş farklı makinalara ait karakteristikler, birbirleri ile kolaylıkla karşılaştırılabilir.



Şekil 12.1 Senkron Generatör karakteristیکlerinin çıkartılmasında kullanılan bağlama şeması

12.2. Senkron Generatörün Boşta Çalışma Karakteristiğı

Senkron Generatör tahrik makinası ile $n = n_s$ devirde döndürölür ve deney süresince sabit kalması sağlanır. Daha sonra R_{fg} reostasının en büyük değeriinde olması temin edilerek S1 anahtarı kapatılır. S1 haricinde bütün anahtarlar açıktır. Endüklenen EMK'in uyarma akımına göre değışimi ($E_f = f(I_f)$) boşta çalışma karakteristiğini verir (Şekil 12.2). Karakteristik aynı doğru akım generatöründeki gibidir. Artan uyarma



Şekil 12.2 Senkron generatörün boşta çalışma karakteristik eğrisi

akımı ile endüklenen EMK arasındaki ilişki histerizis eğrisinin ölçek farkı ile

aynısıdır.

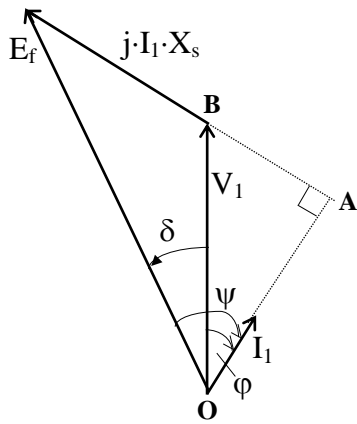
E_r ; remenans (kalıcı mıknatısiyet) gerilimi olup nominal gerilimin % 5 'i kadardır.

12.3. Senkron Generatörün Dış Karakteristiği

Senkron generatörde endüvi reaktansının büyüklüğü hakkında fikir sahibi olmayı sağlayan bu karakteristik, sabit ikaz akımı ve sabit güç faktöründe uç gerilimi ile yük akımı ($V_1 = f(I_1)$) arasındaki ilişkiyi verir. kapasitif yüklerde uç gerilimi artarken endüktif yüklerde azalır. Omik yükte ise bir parça azalma gösterir.

Deneyi yapmak için senkron generatör n_s hızında tahrik edilir. S1 uyarma anahtarı kapatılıp, uyarma reostası ile generatörün uç gerilimi nominal değerine ayarlanılır. Daha sonra istenilen $\cos\phi$ değerine uygun S2, S3 ve S4 kapatılarak (saf omik yük için; S2, endükti

$R_a \cong 0$ ve $X_s = X_a + X_\sigma$ olarak, endüktif çalışan yuvarlak kutuplu senkron generatör için fazör diyagramı çizip, Pisagor bağıntısını uygulayalım.



$$|\overline{OA}| = V_1 \cdot \cos\phi$$

$$|\overline{AB}| = V_1 \cdot \sin\phi$$

$$E_f^2 = (V_1 \cdot \cos\phi)^2 + (V_1 \cdot \sin\phi + I_1 \cdot X_s)^2$$

Bütün terimler E_f^2 ile bölünürse;

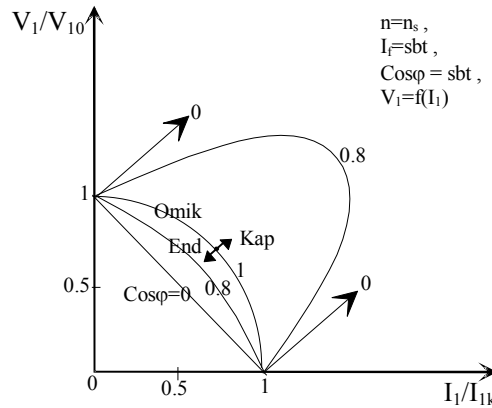
$$\frac{V_1^2}{E_f^2} + \frac{I_1^2 \cdot X_s^2}{E_f^2} + \frac{2 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot X_s}{E_f^2} \cdot \sin\phi = 1$$

$E_f = V_{10}$; Boşta çalışma gerilimi

$I_{lk} = \frac{E_f}{X_s}$; Kısa devre sürekli akımı olduğuna göre

$$\left(\frac{V_1}{V_{10}}\right)^2 + \left(\frac{I_1}{I_{lk}}\right)^2 + 2 \cdot \frac{V_1}{V_{10}} \cdot \frac{I_1}{I_{lk}} \cdot \sin\phi = 1 \quad (12.9)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade her ϕ açısı için bir elips verir. $\sin\phi = 0$ için denklem; daire, $\sin\phi = 1$ için; doğru verir (Şekil 12.3).

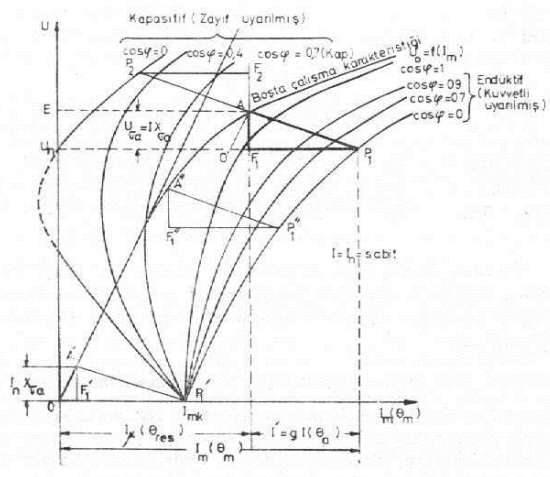


Şekil 12.3 Senkron generatörün dış karakteristiği

12.4. Senkron Generatörün Yük Karakteristiği

Generatörün boştaki çalışma karakteristiğine boştaki mıknatıslanma eğrisi denirken yük karakteristiği de, nominal akımında (sabit) icra edildiği için yükteki mıknatıslanma eğrisi de denir.

Uç gerilimi ile ikaz akımı arasındaki karakteristiğin sabit yük akımı ve güç faktöründe çıkartılması yük karakteristiğini verir.



Şekil 12.4 Yük Karakteristiği

E -V_{1n} miktarı , kaçak reaktanstan oluşan gerilim düşümü olup, A₁F₁E₁ üçgenine POTİER üçgeni denir. F₁P₁ endüvi alanının uyarma amper sarımına indirgenmiş değeridir ve I'= g.I 'dir. Cosφ = 0 durumunda elde edilen POTİER ÜÇGENİ tüm

karakteristik boyunca sabit çevre ve alana sahiptir. Kapasitif durumda ise bu üçgen şekilde görüldüğü gibi ters döner faz farkı saf endüktife göre 180^0 olmuştur.

Karakteristiğin elde edilmesi için generatör sabit devirle tahrik edilir. n_s , güç katsayısı ve yük akımı sabit tutularak $V_1 = f(I_f)$ elde edilir. bu bağlantının sağlanması için generatör tahrik edilip n_s devre ulaşıldıktan sonra, Şekil 12.1 'de S1 kapatılıp istenilen yük çeşidine göre S2 ve/veya S3, S4 kapatılarak muhtelif güç faktörlerinde yükleme yapılır. $\cos\phi$ 'nin sabit tutulması gerektiğinden,

$$\phi = \arctg\left(\frac{I_c}{I_R}\right) \text{ yada } \phi = \arctg\left(\frac{I_L}{I_R}\right) \quad (12.10)$$

parametrelerine dikkat edilmelidir.

V_σ : Kaçak reaktans gerilim düşümü V_r : Omik direnç gerilim düşümü olmak üzere; Şekil 12.4 'te;

$$|A_1 F_1| = V_\sigma \cdot \sin\phi + V_r \cdot \cos\phi \quad (12.11a)$$

Saf endüktif durumda $\cos\phi = 0$ ve $\sin\phi = 1$ olduğundan ;

$$|A_1 F_1| = V_\sigma \cdot \sin\phi = V_\sigma = X_\sigma \cdot I_1 \quad (12.11b)$$

olur. Bu bağıntıdan X_σ deneysel olarak bulunabilir, yaklaşık bir değerdir ve gerçek kaçak reaktanstan biraz büyüktür. Fakat büyük bir yaklaşıklık ile kullanılabilir. Dış karakteristeki $|A_1 F_1|$ 'in gerçek adı POTİER REAKTANSI; X_p 'dir.

Yuvarlak Rotorlu makinada;

$$|F_1 P_1| = I' = g \cdot I \quad (12.12)$$

olup, burada;

I' = Endüvi akımının kutup tekerleğine indirgenmiş hali

Güncellenecek...