

UTPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Câmpus Ponta Grossa

G.T.D. 1

Prof. MSc Jeferson José Gomes

Universidade Tecnológica rumo aos 10 anos

UTPR

UTPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Câmpus Ponta Grossa

GTD 1

TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

UTPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Câmpus Ponta Grossa

Análise dos Sistemas de Potência

Um sistema elétrico de potência é uma estrutura complexa, quase sempre interligada regional ou nacionalmente, que necessita de estudos sérios para o seu planejamento e operação.

TUST - tarifa de uso do sistema de transmissão
TUSD - tarifa de uso do sistema de distribuição

UTPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Câmpus Ponta Grossa

Análise dos Sistemas de Potência

UTPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Câmpus Ponta Grossa

Análise dos Sistemas de Potência

Gerar, transmitir e distribuir a eletricidade: essa tríade é o objetivo de todo sistema de potência. No entanto, tais passos devem ser dados dentro de certos padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custo financeiro.

A **confiabilidade** indica a probabilidade de o sistema, ou parte dele, realizar suas funções por um determinado período de tempo sem cometer falhas, ou seja, o tempo que levará para falhar.

UTPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Câmpus Ponta Grossa

Análise dos Sistemas de Potência

A **disponibilidade** é definida como a probabilidade de que o sistema esteja operando adequadamente quando requisitado para o uso. A disponibilidade, então, nada mais é do que a probabilidade de um sistema não estar com falha ou em reparo quando solicitado a entrar em operação. Matematicamente, a disponibilidade (D) é:

$$D = \frac{T_m}{T_r} \text{ em que}$$

T_m é o tempo médio entre as falhas,
 T_r é o tempo médio do reparo, incluído, neste, o tempo de detecção até a retificação da falha

Análise dos Sistemas de Potência

A Transmissão em CA e a Transmissão em CC

O modelo de transmissão de energia elétrica que prevaleceu na maioria das aplicações é o que faz uso da corrente alternada (CA). As razões para a escolha desta em vez da outra, em corrente contínua (CC), são várias, entre elas:

- (a) Para grandes quantidades de energia, a geração CA é mais econômica do que em CC;
- (b) Os motores em CA são mais baratos;
- (c) Quando se emprega CA, usa-se transformadores para alterar os níveis de tensão ou correntes elétricas;
- (d) A transformação de CA para CC é barata e eficiente, e bem mais simples do que o caminho inverso.

Análise dos Sistemas de Potência

A Transmissão em CA e a Transmissão em CC

O uso de CC, ainda que bem restrito, tem sua importância e aplicação em alguns casos (como na alimentação de motores de CC). No caso de **linhas de transmissão em CC**, por exemplo, não ocorrem os fenômenos de indutância e capacitância. Estes, presentes em CA, podem gerar perdas ao sistema, o que, logicamente, não é recomendável. Outro detalhe a ser considerado no caso de circuitos em CC é que estes não são envolvidos com maiores complicações de cálculo, uma vez que grandezas constantes levam a equações com solução e entendimento menos complexos.

Análise dos Sistemas de Potência

O Transitório e o Regime Permanente

No processo de inicialização de um sistema elétrico, CA ou CC, quando ocorre a energização desse, é comum falar-se em transitórios e regime permanente. **Transitório** é o momento decorrido em um circuito no qual as tensões e correntes se ajustam até atingir o instante de estabilidade, regime permanente. O tempo gasto pelo transitório dependerá dos elementos que compõem o circuito (na prática é geralmente, da ordem de ms). Após o transitório, temos o **regime permanente**, que só é quebrado quando ocorre alguma falta ou interrupção do sistema. O transitório ou *transiente ou surge*, pode ter diversas origens: **(i)** Retorno de energia elétrica; **(ii)** Descarga atmosférica nos condutores da rede de distribuição primária ou secundária (spike ou surto de tensão); **(iii)** Chaveamento de cargas; e **(iv)** Mau funcionamento de equipamentos elétricos.

Análise dos Sistemas de Potência

Causas e Consequências de um Baixo Fator de Potência

Há diversas causas para os baixos FP nas instalações elétricas. Algumas são:

- Transformadores operando em vazio ou com pequenas cargas;
- Motores de indução operando em vazio ou sobrecarregados;
- Reatores de lâmpadas fluorescentes.

Análise dos Sistemas de Potência

Causas e Consequências de um Baixo Fator de Potência

Consequências de um circuito operando com baixo FP:

- A necessidade de se ter condutores com bitolas maiores;
- A necessidade de equipamentos de proteção/manobra com capacidade superior;
- Maiores riscos de acidentes elétricos (curtos-circuitos);
- Aumento da tarifa de energia;
- Um maior valor da intensidade de corrente elétrica;
- Maiores perdas elétricas por efeito joule;
- Oscilação de tensão nos circuitos de distribuição.

O fator de potência é um dado intrínseco ao equipamento, sendo seu valor disponibilizado pelos fabricantes. Em instalações críticas, em que o fator de potência é considerado baixo e compromete o rendimento do serviço, é possível usar um conjunto de capacitores (banco de capacitores) para corrigir a eficiência do sistema.

Análise dos Sistemas de Potência

A Compensação de Reativos

Os capacitores quando aplicados em sistemas de potência, têm como objetivo a compensação de energias reativas produzidas por cargas indutivas ou reatâncias de linhas. Em um sistema de distribuição de energia elétrica, é comum o uso de capacitores para compensar a potência reativa e, consequentemente, obter um melhor perfil da onda de tensão, aumentando a capacidade da rede de atender às cargas. Dessa forma, o uso correto desses dispositivos permite a obtenção de uma melhor qualidade de energia, com a redução das perdas e a melhoria do fator de potência. Determinadas cargas injetam energia reativa indutiva na rede, já que, por sua natureza, não geram trabalho útil, aumentando sua potência. O oposto dessa energia é justamente a energia reativa capacitiva, que é, então, injetada na rede, visando minimizar o tráfego de potência reativa nela.

Análise dos Sistemas de Potência

A Compensação de Reativos

É importante perceber que a redução das perdas representa lucro na distribuição de energia. A solução técnica de determinar o local, a quantidade e a dimensão dos capacitores representará uma melhor eficiência para a rede. O controle dos reativos pode ser feito de três modos:

- I. Com um banco fixo de capacitores ligados diretamente ao barramento – opção mais barata, mas pode trazer problemas quando houver cargas dinâmicas, pois isso geraria um excesso de compensação;
- II. Com um banco semiautomático de capacitores ligados ou retificados próximos às cargas, praticamente junto a elas — o controle, nesse caso, é seletivo e, consequentemente, melhor e mais custoso; e,
- III. Com o acionamento automático e independente de um banco de capacitores, que opera de modo otimizado e de acordo com as leituras da carga, melhorando o FP do circuito. Indicado para a maioria das cargas dinâmicas, é a opção mais cara.

Análise dos Sistemas de Potência

A Qualidade da Energia

Quando tratamos da qualidade da energia elétrica, refere-se diretamente ao padrão da energia gerada — no caso brasileiro, a onda senoidal de 60 Hz. Quanto mais ela se encontrar alterada, em amplitude ou frequência, menor será a qualidade de energia. A alteração pode se dar por quedas e surtos de tensão, pela geração de outras frequências diferentes da fundamental etc. O fenômeno pode acontecer no regime transitório ou no permanente e nas fases de geração, transmissão, distribuição ou consumo de energia. Muitas vezes, a expressão qualidade da energia está relacionada com a continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica ou com equipamentos elétricos. A interrupção do funcionamento de ambos pode representar um prejuízo de milhões.

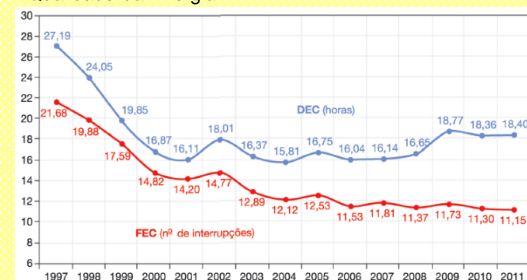
Análise dos Sistemas de Potência

A Qualidade da Energia

As concessionárias de energia têm a obrigação de controlar os índices de qualidade de energia. No Brasil, a Aneel fiscaliza as distribuidoras por meio dos parâmetros DEC (duração equivalente por consumidor) e FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora). A DEC indica o número de horas durante as quais, em média, um consumidor não recebe energia elétrica em um dado período (geralmente, um mês ou um ano), e a FEC indica a quantidade média de horas ou minutos em que a interrupção aconteceu na unidade consumidora. Outros parâmetros também são usados, como a forma de onda, a simetria do sinal e a faixa-limite do nível de tensão.

Análise dos Sistemas de Potência

A Qualidade da Energia



Parâmetros DEC e FEC no período de 1997 a 2011 no Brasil.

Transmissão de Energia Elétrica

A linha de transmissão é um dos principais componentes de um sistema elétrico de potência.

Sua função primária é transportar a energia elétrica, com o mínimo de perdas, do centro de geração aos centros de cargas, geralmente separados por distâncias elevadas.

Uma linha de transmissão é formada, basicamente, por condutores, torres, cabos para-raios e isoladores.

Ela pode ser descrita matematicamente em termos de ondas eletromagnéticas transversais, sendo ideal aquela linha cuja resistência é nula, em que não há perdas por efeito joule (térmico).

Transmissão de Energia Elétrica

Quando uma linha é energizada, cargas elétricas originam campos elétricos, e o movimento delas dá origem a campos magnéticos que se propagam do gerador ao receptor — a uma velocidade v , que é dada por:

$$v = \frac{l}{T}$$

em que l é o comprimento da linha (km), e T (s) é o tempo decorrido até que a tensão no receptor alcance o valor da fonte de geração. Em uma linha com corrente elétrica I , se não mudarmos o valor da tensão V de geração, podemos definir a impedância em sua entrada por: $Z = \frac{V}{I}$

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Câmpus Ponta Grossa

Transmissão de Energia Elétrica

Classificação das Linhas de Transmissão

A evolução histórica dos sistemas de energia elétrica (tanto de forma regional quanto nacional) não permitiu uma padronização das tensões. Os níveis das tensões padronizadas no Brasil são:

- Transmissão: 750, 500, 230, 138 e 69 kV;
- Subtransmissão: 138, 69 e 34,5 kV.

Há as chamadas linhas de ultra-alta-tensão, de valores acima de 765 kV. As linhas de transmissão são classificadas em:

- Linhas de transmissão longas: comprimento > 249 km;
- Linhas de transmissão médias: 80 < comprimento < 249 km
- Linhas de transmissão curtas: comprimento < 80 km.

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Câmpus Ponta Grossa

Transmissão de Energia Elétrica

Classificação das Linhas de Transmissão

No Brasil, a Resolução da Aneel no 456/2000 estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, definindo seis subgrupos:

- Subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV (**SIN**);
- Subgrupo A2 – tem são de fornecimento de 88 kV a 138 kV(**SIN**);
- Subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
- Subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- Subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- Subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, atendida a partir de um sistema subterrâneo de distribuição e faturada neste grupo em caráter opcional.

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Câmpus Ponta Grossa

Transmissão de Energia Elétrica

Classificação das Linhas de Transmissão

A estrutura de transmissão de energia elétrica é basicamente formada por tecnologia FACTS (flexible ac transmission systems) e HVDC (high voltage direct current).

Sistemas de subtransmissão são usados para transmitir potência a grandes consumidores. Os valores de tensão para conceituar uma subtransmissão geralmente variam de região para região. No Brasil, de modo geral, as linhas de 69 kV são consideradas de subtransmissão.

Uma linha de transmissão pode ser subterrânea, o que frequentemente leva a um custo de três a dez vezes maior do que o da linha aérea tradicional. A opção pela subterrânea se dá, normalmente, em áreas urbanas. Os cabos são feitos de materiais a base de polietileno, podendo comportar tensões de transmissão da ordem de 400 kV.

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Transmissão de Energia Elétrica

As Linhas de Transmissão no Brasil

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Câmpus Ponta Grossa

Transmissão de Energia Elétrica

As Linhas de Transmissão no Brasil

Extensão da Rede de Transmissão (km)	Projeção ONS - 2023
800 kV	4.600
750 kV	2.683
600 kV	12.816
500 kV	47.750
440 kV	6.748
345 kV	10.320
230 kV	56.471
Total	141.388
	185.484

Fonte: ONS

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Câmpus Ponta Grossa

Transmissão de Energia Elétrica

Histórico da Transmissão

O primeiro uso prático das linhas de transmissão foi relacionado ao contexto do **telégrafo**. Por volta de 1837, já havia um sistema comercial de telégrafo cobrindo distâncias de até 20 km.

Historicamente o suprimento de energia elétrica iniciou-se quando Edison alimentou parte da cidade de Nova York em 1880 em corrente contínua.

Posteriormente, a maior flexibilidade oferecida pela corrente alternada, permitindo gerar numa tensão, transmitir em outra e ainda distribuir em outro nível, fez com que esta passasse a ser utilizada com maior intensidade.

Transmissão de Energia Elétrica

Histórico da Transmissão

A invenção do motor de gaiola, simples, robusto e confiável, peça essencial na indústria, foi também um fator decisivo na adoção universal do suprimento de energia elétrica em CA.

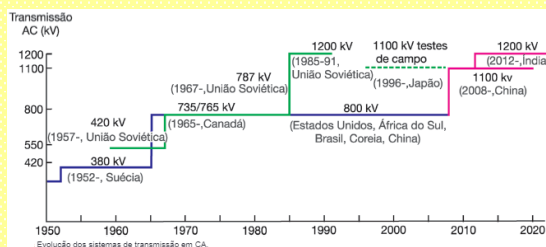
Surgiram assim as primeiras linhas de transmissão, evoluindo no nível de tensão e capacidade de transmissão a medida que o desenvolvimento científico e tecnológico permitia um conhecimento cada vez maior dos fenômenos elétricos de transporte de energia.

Em 1912, entrou em operação a primeira linha de transmissão de 11 kV, e, em 1923, a primeira de 220 kV. Nos Estados Unidos, em 1953, entrou em operação a primeira linha de 345 kV, pela American Electric Power. A partir de 1967, na URSS e também nos Estados Unidos e Canadá, foram construídas linhas de 765 kV.

Transmissão de Energia Elétrica

Histórico da Transmissão

Evolução mundial dos sistemas de transmissão em CA.



1952	Início da instalação do sistema de 345 kV da norte-americana American Electric Power (AEP). Um sistema de 380 kV estava sendo construído na Suécia neste mesmo período.
1957	Implantação de uma linha de 420 kV na Rússia.
1959	Implantação de uma linha de 525 kV na Rússia.
1965	Desenvolvimento do primeiro sistema de 735 kV pela canadense Hydro-Québec.
1967	Implantação de uma linha de 787 kV na Rússia.
1969	Instalação da linha de transmissão de 765 kV pela norte-americana AEP nos EUA.
1973	Início da transmissão em 500 kV pela empresa japonesa Tokyo Electric Power Company (Tepco).
1981	Comissionamento de linhas de 500 kV na China.
1985	Implantação de uma linha de 1.000 kV na Rússia.
1988-1989	Início da construção do circuito duplo de 1100 kV pela Tepco.
1992-1993	Finalização da primeira etapa da construção do circuito duplo de 1100 kV pela Tepco, composta por dois trechos (de 240 km cada).
1999	Finalização da segunda etapa da construção do circuito duplo de 1100 kV pela Tepco, composta por dois trechos (de 240 km cada).
2008	Linha de 1100 kV entra em operação na China.
2010	Início da operação do circuito duplo de 1100 kV pela Tepco (opera em 500 kV até 2010) no Japão.
2012-2013	Linha com capacidade de 1.200 kV planejada para entrar em operação na Índia.

Transmissão de Energia Elétrica

Histórico da Transmissão

O pioneirismo em sistemas de transmissão em CA de até 800 kV é do Canadá (1965).

Diversas pesquisas sobre linhas de 1100 kV foram feitas no início da década de 1970 pela italiana Enel em conjunto com a Tepco e com o Centro de Pesquisa CESI.

O Brasil implantou linhas de transmissão de 345, 440, 500 e 750 kV, respectivamente, nos anos de 1963, 1971, 1971 (novamente) e 1982.

No caso da transmissão em CC, já se encontra em operação uma linha de 800 kV na China.

Transmissão de Energia Elétrica

Comparações entre a Transmissão em CA e a Transmissão em CC

A potência elétrica pode ser transmitida em CC ou CA (corrente contínua e corrente alternada, respectivamente). Cada sistema tem suas vantagens e desvantagens.

Transmissão em CC:

- Não tem fases, ela tem um polo negativo e outro positivo.
- A frequência é zero, portanto não há com que se preocupar em relação às variações de frequência entre os sistemas interconectados.

Transmissão de Energia Elétrica

Comparações entre a Transmissão em CA e a Transmissão em CC

Transmissão em CC:

- Links de alta-tensão são usados para transmitir elevada quantidade de energia ao longo de grandes distâncias. Neste caso, conversores e inversores são usados para fazer a conversão CA-CC e CC-CA, respectivamente.
- No Brasil, temos um bom exemplo de um link CC: uma das linhas de transmissão que parte da Hidrelétrica Binacional de Itaipu com destino a Ibiúna (SP). Na Índia, há uma linha de transmissão de 500 kV, com 814 km entre Rihand e Deli.

Transmissão de Energia Elétrica

Comparações entre a Transmissão em CA e a Transmissão em CC

Transmissão em CC:

Algumas vantagens:

- (a) Não há indutância ou capacitância;
- (b) Não há efeito pelicular, portanto toda a área da seção circular do condutor é usada;
- (c) Não há perdas dielétricas, particularmente no caso dos cabos.

Algumas desvantagens:

- (a) A energia elétrica não pode ser gerada em altos valores de tensão, devido a problemas de conversão;
- (b) A tensão não pode ser elevada para transmissão de potência em altas-tensões;
- (c) Os disjuntores e interruptores têm suas próprias limitações.

Transmissão de Energia Elétrica

Comparações entre a Transmissão em CA e a Transmissão em CC

Transmissão em CA: opção que predominou em praticamente todos os sistemas. Seguem algumas vantagens:

- a. A potência pode ser gerada em altas-tensões;
- b. A manutenção das subestações é mais fácil e mais barata;
- c. A tensão pode ser elevada ou abaixada por transformadores com alguma facilidade e eficiência, o que permite transportar energia em altas-tensões e distribuí-la em níveis seguros.

Algumas desvantagens:

- a. Necessita de mais cobre do que a opção em CC;
- b. A construção da linha de transmissão é mais complicada do que a da linha em CC;
- c. Devido ao efeito pelicular, a resistência efetiva da linha aumenta;
- d. A LT tem capacitância, havendo, portanto, uma perda contínua de potência devido à corrente de carga (mesmo com a linha aberta).

Transmissão de Energia Elétrica

Escolha da Tensão de Transmissão

- a) O critério de Alfred Still, apresenta resultados satisfatórios para linhas de transmissão com dimensões superiores a 30 km.

$$V \cong 5,5 \sqrt{0,62l + \frac{P}{100}} \quad \text{em que:}$$

V (kV) é a tensão entre fases;

l (km) é o comprimento da linha de transmissão; e,

P (kW) é a potência média que se deseja transmitir.

Transmissão de Energia Elétrica

Escolha da Tensão de Transmissão

- b) O critério da potência natural é mais usado no caso de linhas de transmissão de alto comprimento, em que, para cada tensão, há um valor ótimo de energia que é transmitido (e vice-versa), podendo não ser aquele no qual as perdas seriam mínimas. De acordo com esse critério, a potência a ser transmitida P (MW) é indicada pela tensão V (kV), que varia com Z , a impedância natural da linha:

$$V = \sqrt{P \cdot Z}$$

A impedância (Z) não depende do comprimento da linha de transmissão, apenas da configuração dos condutores.

Transmissão de Energia Elétrica

Escolha econômica da Tensão de Transmissão

Inicialmente, é necessário alguns dados para que se possa fazer uma escolha econômica da tensão de transmissão. Três deles são básicos: tensão de geração, potência a ser transmitida e comprimento da linha de transmissão.

Uma linha em CC, p. ex., pode ter vantagens econômicas em relação a uma CA. O custo total para construir e operar uma linha em CC, incluindo as estações de conversão, pode ser menor do que o equivalente com uma linha em CA.

Transmissão de Energia Elétrica

Escolha econômica da Tensão de Transmissão

A tendência atual é seguir certas fórmulas empíricas para encontrar a tensão de transmissão mais economicamente viável.

Dessa maneira, nos Estados Unidos, a tensão econômica de transmissão para uma linha trifásica é geralmente dada por:

$$V \cong 5,5 \sqrt{0,62l + \frac{3P}{150}}$$

em que V é a tensão da linha (kV), P é a potência máxima por fase a ser entregue, e l é o comprimento da linha de transmissão (km). Se a potência a ser transmitida for alta, uma maior gama de unidades de transformação e geração, portanto, serão empregadas.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

O efeito corona é uma descarga elétrica gerada pela ionização do ar nos arredores do condutor, após exceder determinado limite e em condições insuficientes para gerar um arco voltaico.

A alta voltagem das linhas de transmissão produz uma descarga (corona) que gera ondas eletromagnéticas. A corona pode se manifestar por meio de um ruído audível, que ocorre em função dos máximos gradientes de potencial na superfície dos condutores.

O rápido aumento das transmissões de rádio e TV levaram à ocorrência de problemas ligados à interferência eletromagnética. Essas ondas alteram a recepção de rádios e TVs, o que, inclusive, já resultou em protestos públicos e na oposição à construção de linhas próximas às cidades.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

A descarga corona gera pulsos de corrente de curta duração (μ s), a faixa de frequência de repetição pode estar na dos megahertz.

Os condutores sob efeito corona produzem ozônio em seus arredores. Também pode surgir corona em outros componentes das linhas (ferragens e isoladores), mas a intensidade dos ruídos gerados é bem inferior à dos provenientes dos condutores.

Ferragens defeituosas e pinos mal ajustados podem gerar pulsos eletromagnéticos que interferem na faixa de frequência modulada (FM).

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

Para evitar o efeito corona, o campo elétrico superficial do condutor deve ser menor do que o campo elétrico crítico da corona (E) — sendo este dado em kVpico/cm, por meio da fórmula de Peek: $E = 30 \cdot m \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}}\right)$ em que:

m é o fator de rugosidade do condutor (adimensional),

δ é a densidade relativa do ar (1,2928 kg/m³ a 0°C e ao nível do mar, ou seja, 1 atm), e

r é o raio do condutor (cm).

Para um condutor perfeitamente cilíndrico, temos que $m = 1$ (de modo geral, adota-se $0,75 \leq m \leq 0,85$ para uma representação mais realista, no caso de uma linha de transmissão).

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

Economicamente, não é possível ainda se projetar uma LT aérea com tensões acima de 100 kV que não gere radio interferência.

Existem critérios de atenção que resultam em níveis aceitáveis de perturbação para essas linhas. As ondas de sobretensões propagadas ao longo da LT são afetadas pelo efeito corona, fruto de descargas atmosféricas, devendo-se ter, portanto, uma atenção especial ao estudo da proteção do sistema.

O efeito corona é acompanhado por quatro características: ruído sonoro, produção de ozônio, perda de energia e interferência.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

A formação da corona se dá em virtude de sempre haver alguma ionização do ar por causa dos raios cósmicos, da radiação ultravioleta e da radioatividade.

Assim, em condições normais, o ar ao redor de um condutor sempre contém partículas ionizadas e moléculas neutras. A descarga elétrica no ar é geralmente iniciada por um campo elétrico que acelera os elétrons livres já presentes.

Essas descargas acontecem durante ambos os ciclos (positivo e negativo) da tensão de operação da linha, porém aquelas que acontecem durante os ciclos positivos são as que irradiam ruídos capazes de interferir na frequência de recepção das transmissões em AM (amplitude modulada) — especialmente, nas faixas de ondas médias.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

Em uma LT, as descargas corona podem acontecer quando a diferença de potencial entre uma das fases e o solo ultrapassa determinado valor crítico de ruptura.

O valor desta tensão de ruptura depende de uma gama de fatores, como a pressão atmosférica, a quantidade de vapor d'água no ar e o tipo de tensão em questão (CA ou CC).

Proveniente do campo elétrico da LT, a energia liberada pela corona representa uma perda — estas perdas levam a consequências econômicas e são assunto de pesquisa já há mais de 50 anos. Só mais recentemente é que as pesquisas relacionadas a elas avançaram significativamente.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

As perdas que acontecem nas LT estão relacionadas, principalmente, com as condições meteorológicas do local, mas também com a geometria dos condutores, com as tensões de operação e com os gradientes de potencial nas superfícies desses condutores.

As perdas por efeito corona em linhas com tensões extra elevadas podem variar de alguns kW/km até algumas centenas de kW/km, sob condições climáticas adversas.

Em condições de chuva, as perdas dependem não apenas do índice de precipitação, mas também da quantidade de gotas d'água que conseguem aderir à superfície dos condutores.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

O efeito corona pode acontecer durante os surtos de sobre tensões, durante a ocorrência de descargas atmosféricas ou de operações de manobras e chaveamentos.

O efeito indesejável da corona também pode ocorrer em transformadores, motores elétricos, capacitores e geradores, prejudicando o isolamento interno destes dispositivos e levando-os a falhas.

Sistemas de alta-tensão geram campos eletromagnéticos de baixa frequência (60 Hz) e de alta (na faixa dos MHz), devido, principalmente, ao efeito corona presente nos cabos e equipamentos das LT. Na prática, isso resulta em problemas de dois tipos: segurança pessoal e interferência em equipamentos eletrônicos (estações de rádio e celulares, por exemplo).

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

O ruído da linha de transmissão pode ser transmitido por três meios: condução, indução ou radiação.

Na indução, por exemplo, a interferência se dá quando a LT está suficientemente próxima do receptor ou mesmo de outra LT.

A condução e a indução são, geralmente, responsáveis pelas interferências de baixa frequência, já que a intensidade da corrente elétrica conduzida rapidamente diminui com a frequência.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

Há dois tipos de ruídos de LT: o intervalo de centelha em isoladores e a descarga de corona.

Os ruídos causados por falhas em isoladores são os responsáveis pela maioria das interferências de LT. A faísca (centelhamento) acontece quando uma **d.d.p.** é gerada entre dois condutores, o que ioniza o ar, diminuindo sua resistência.

Deste modo, a corrente flui por meio do ar ionizado, cuja resistência varia e provoca alterações na corrente que podem ser induzidas e propagadas nas linhas de transmissão. As ondas resultantes contêm energia harmônica suficientemente forte, podendo causar interferência até mesmo na região do VHF (very high frequency – frequência muito alta).

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

Diferente do efeito corona, o ruído de centelhamento está, em geral, relacionado às boas condições climáticas, podendo, inclusive, desaparecer durante a chuva, já que a precipitação causa um curto-circuito nos intervalos entre os isoladores e nas peças usadas na estrutura de sustentação dos cabos que estão alocados no poste. O ruído de centelhamento e o de corona se apresentam com um zumbido sonoro.

Na década de 1960, o campo elétrico ao redor de uma linha de alta-tensão se tornou assunto de preocupações públicas, o mesmo ocorrendo na década seguinte com relação ao campo magnético de uma LT. Na época, vários artigos de jornais comentavam sobre os efeitos nocivos à saúde causados pelos campos magnéticos, o que levou a intensas pesquisas sobre o assunto por todo o mundo.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

A preocupação principal era a de que a exposição aos campos magnéticos causaria câncer (leucemia). O governo dos Estados Unidos relatou que não havia nenhuma evidência de que um campo magnético moderado de 60 Hz causaria câncer.

No entanto, essa opinião não foi compartilhada por todos. O primeiro estudo que liga a ocorrência de leucemia na infância aos campos magnéticos gerados por correntes elétricas foi publicado em 1979 por Wertheimer e Leeper. Trata-se de um estudo estatístico em que a configuração do enrolamento elétrico perto da casa da vítima foi relacionada ao câncer, encontrando-se uma correlação entre a ocorrência da doença e as linhas de energia de alta corrente. Esse estudo foi rejeitado por causa de algumas inconsistências, voltando a ser analisado novamente em 1988 por Savitz e outros.

Transmissão de Energia Elétrica

O Efeito Corona

A corrente elétrica em um condutor cilíndrico gera um campo magnético ao redor deste, com linhas em formato de círculos concêntricos. Em cada ponto ao redor do condutor, a força-intensidade do campo magnético é descrita por um vetor de campo, que é perpendicular ao raio do centro do condutor. Tal vetor, simbolizado por H , tem os componentes horizontal e vertical, e sua intensidade é calculada a partir da Lei de Ampère:

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{I}{2\pi \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2}}$$

em que:

H é a intensidade de campo magnético (em A/m),
 I é a intensidade de corrente elétrica do condutor (em A),
 r é a distância do condutor,
 X e Y são as coordenadas do ponto de observação, e
 x_i e y_i são as coordenadas do condutor.

Transmissão de Energia Elétrica

Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

Os parâmetros de uma LT são distribuídos ao longo de seu **comprimento**. Assim, as tensões e correntes envolvidas na se comportarão como ondas, encontrando soluções matemáticas em **equações diferenciais**, que podem ser resolvidas em duas no domínio do tempo ou no domínio da **frequência**.

Um condutor elétrico de uma LT tem **4** parâmetros elétricos, que são combinações de resistência, indutância, capacitância e condutância (R e L em série, e os dois últimos em combinação shunt), simbolizados respectivamente por **R**, **L**, **C** e **G**. Tais parâmetros são distribuídos uniformemente ao longo do comprimento da linha, **não sendo possível uma representação independente** destas grandezas em qualquer ponto dela. Diz-se também que tais parâmetros não são caracterizáveis discretamente. Optou-se, então, por **expressá-los em função do comprimento da linha**. R , L e C dependem do material usado e das dimensões físicas do condutor.

Transmissão de Energia Elétrica

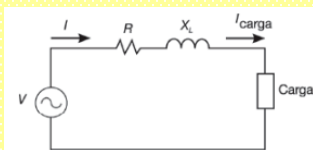
Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

A indutância e a capacitância são produzidas pela presença de campos **magnéticos e elétricos** em torno dos condutores e dependem de sua disposição geométrica. A indutância está presente nas linhas de transmissão em CA, e a capacitância se torna mais relevante em linhas superiores a **80 km** e com tensões a partir de 34,5 kV. A **condutância** ocorre devido a **correntes de fuga** que fluem por meio dos isoladores e do ar. Como a corrente de fuga é consideravelmente pequena, comparada à corrente nominal, ela acaba sendo esquecida, fazendo, então, com que a **condutância** seja normalmente desconsiderada para o modelamento de uma LT. A disposição dos parâmetros que representam uma LT depende do comprimento desta, sendo mostrados na forma de um circuito elétrico. A análise é feita para três situações, para LT curta, média e longa.

Transmissão de Energia Elétrica

Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

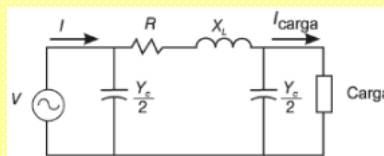
Linha de transmissão curta: são menores que 80 km. Nesse caso, o efeito do capacitor shunt pode ser desprezado, sendo consideradas apenas a resistência e a reatância indutiva (parâmetros série). Assumindo as condições de equilíbrio, a linha pode ser representada por um circuito equivalente monofásico, com uma resistência R e uma reatância indutiva X_L em série.



Transmissão de Energia Elétrica

Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

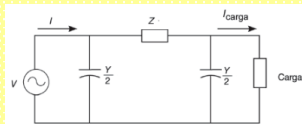
Linha de transmissão média: entre 80 km e 240 km. Nesse caso, o efeito do capacitor shunt (Y_C) é dividido em duas partes iguais, dispostas no início e no fim da linha. Esta é representada também por um circuito equivalente monofásico, sendo chamada de configuração π .



Transmissão de Energia Elétrica

Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

Linha de transmissão longa: maior do que 240 km, então, os parâmetros têm de ser considerados uniformemente distribuídos ao longo da linha. A impedância e a capacitância shunt são determinadas por meio da solução de equações diferenciais, em que a tensão e a corrente são descritas em função da distância e do tempo.



Temos: $Z = zl$ (impedância em série equivalente – Ω); $Y = yl$ (admitância shunt equivalente total – S); z (impedância em série por unidade de comprimento – Ω/m); y (admitância shunt por unidade de comprimento S/m); e $Y = \sqrt{ZY}$ (constante de propagação).

Transmissão de Energia Elétrica

Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

No caso CC, a resistência R de um condutor de comprimento l e seção transversal A é dada por:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

em que ρ é a resistividade do material do condutor em Ω/m . A resistência CC de um condutor é afetada somente pela temperatura de operação, e esta aumenta linearmente. No entanto, quando um condutor está transmitindo em CA, a distribuição da densidade de corrente ao redor de sua seção transversal não é uniforme, em função da frequência CA.

Transmissão de Energia Elétrica

Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

Esse efeito, conhecido como **efeito pelicular** (*skin effect*), faz com que a resistência CA seja maior do que a CC. Para o caso de uma frequência de 60 Hz, a resistência CA do condutor de uma linha de transmissão pode ser de 5 a 10% maior do que a opção em CC. A dependência da temperatura da resistência é quantificada pela relação:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

α é o coeficiente de temperatura da resistência. O valor deste é dado por:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 T_1}$$

em que α_0 é o coeficiente de temperatura a 0°C .

Transmissão de Energia Elétrica

Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

Os modelos de LT são desenvolvidos no domínio do tempo ou no da frequência. A representação é mais fácil neste último, pois as linhas são formadas por elementos com características dependentes da frequência.

Por outro lado, o sistema elétrico tem vários elementos não lineares, cuja representação no domínio da frequência não é simples, levando, portanto, a uma preferência por modelos de linha que sejam desenvolvidas no domínio do tempo.

Vale dizer, ainda, que boa parte dos softwares destinados a simulações de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos usam a representação dos componentes no domínio do tempo.

Transmissão de Energia Elétrica

Os Parâmetros de uma Linha de Transmissão

Em uma linha de transmissão, durante o carregamento dos capacitores e indutores, nenhuma corrente alcança a carga. Dessa forma, a impedância que o gerador "vê" só depende dos valores dos capacitores e dos indutores. Essa impedância é chamada de **impedância característica** da linha de transmissão e é dada por: $Z_0 = \sqrt{L/C}$, da equação anterior, conclui-se que uma linha de transmissão sem perdas tem uma impedância característica puramente real, ou seja, uma resistência. No caso de uma linha com perdas,

a impedância característica será: $Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$

Como a ideia é evitar reflexões sucessivas das ondas de tensões e correntes na linha, conecta-se, ao terminal oposto ao da energização, uma carga de valor idêntico ao da impedância característica da linha. Assim, esta se comporta como uma linha infinita, não apresentando reflexões, com impedância característica dada pela equação, em que os elementos R e L são chamados de parâmetros longitudinais, e G e C , de parâmetros transversais da linha.

Transmissão de Energia Elétrica

Planejamento da expansão de um Sistema de Transmissão

O planejamento do sistema de transmissão inicia-se com o estabelecimento dos panoramas de crescimento do consumo de energia demandada pela sociedade, de acordo com previsões ao longo do tempo. É a partir desses panoramas que se verifica a eventual necessidade de se ampliar e fortalecer a rede.

O principal objetivo do planejamento da expansão do sistema de transmissão é obter o plano ótimo de expansão do sistema elétrico.

Transmissão de Energia Elétrica

Planejamento da expansão de um Sistema de Transmissão

O melhor plano de expansão deverá indicar onde deverão ser alocados novos equipamentos para que o sistema opere de forma adequada, que obedeça às restrições operacionais e financeiras para um determinado cenário futuro.

Em um plano de expansão deverá constar a Análise do Fluxo de Carga para determinar a topologia básica da rede de transmissão a ser implementada. Assim como, a Análise Econômica aonde deve ser incluído os custos de perda na transmissão.

Transmissão de Energia Elétrica

Curva de Carga – Curva de duração de Carga

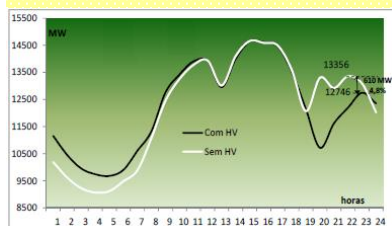
Um sistema de potência monitora continuamente as características de consumo de determinado centro de carga, procurando atender os consumidores de forma confiável e econômica.

O comportamento de grupos de consumidores fornece as empresas de energia elétrica subsídios para implementar novas instalações.

Uma vez estabelecida as características de consumo de um centro de carga, este pode ser representado por um gráfico de curva de carga.

Transmissão de Energia Elétrica

Curva de Carga – Curva de duração de Carga



Consumo mínimo
 04 h – sem HV = 8750 MW
 04 h – com HV = 9600 MW
 Consumo máximo
 15 h – sem HV = 14600 MW
 15 h – com HV = 14600 MW
 Das 14h50 as 16h30

Transmissão de Energia Elétrica

Curva de Carga – Curva de duração de Carga

O Fator de Carga é calculado pela razão entre o consumo total de energia elétrica e a demanda (potência máxima), dentro de um determinado espaço de tempo, como mostra a fórmula: O valor do **Fator de Carga** varia entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1, mais uniforme é o consumo de energia.

A curva de duração de carga é classificada como um fator típico de carregamento utilizado em redes de distribuição. Esta, trata-se de uma curva que permite estabelecer durante quanto tempo a demanda não é menor que um certo valor.

Transmissão de Energia Elétrica

Interligação entre sistemas elétricos

Benefícios:

- *Operação mais econômica do sistema:* a interligação permite que unidades geradores de alto custo de produção sejam substituídas por outras de menores custos.
- *Menores necessidades individuais de reserva girante:* a possibilidade de intercâmbio de reserva girante permite o emprego de unidades de maior porte, propiciando *economia de escala*.
- *Ajuda mútua em caso de emergência*
- *Aproveitamento de diversidade de carga:* leva a redução dos níveis de ponta do sistema como um todo.

Transmissão de Energia Elétrica

Interligação entre sistemas elétricos

Benefícios:

- *Aproveitamento energético da diversidade hidrológica entre bacias distintas:* as bacias hidrográficas entre as regiões sul e sudeste do Brasil, p.ex., possuem regimes diferentes, cabendo a interligação transferir sobras de energia entre regiões em casos de períodos hidrológicos adversos em uma delas.
- *Aumento geral no nível de confiabilidade:* a possibilidade de melhores níveis de tensão e frequência, melhores condições de regulação desta frequência e flexibilidade nos programas de manutenção programada levam um aumento no nível global de confiabilidade da rede.

Transmissão de Energia Elétrica

Interligação entre sistemas elétricos

As interligações entre sistemas também poderão acarretar problemas, já que permite que distúrbios em uma região sejam transferidos para outra. Deve então o planejador estudar meios de minimizar tais inconvenientes, mediante técnicas específicas.

PESQUISE SOBRE AS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MINIMIZAR ESTE PROBLEMA E DESCORRA SOBRE UMA DELAS.

Transmissão de Energia Elétrica

Interligação entre sistemas elétricos

O aumento no nível de curto-circuito é outro aspecto a ser considerado, já que a interligação pode acarretar aumento da corrente de curto-circuito das estações terminais, levando a superação antecipada da capacidade dos disjuntores existentes.

A viabilização do empreendimento somente será possível após quantificar os benefícios e custos associados ao mesmo.

Transmissão de Energia Elétrica

Conceitos básicos de Transmissão em CA

Considere a geração de tensão e corrente na forma senoidal:

$$v = V_p \cdot \sin \omega t$$

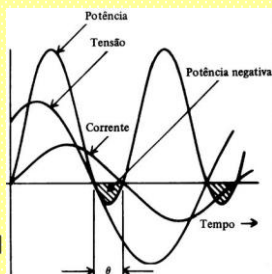
$$i = I_p \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

A potência transmitida será o produto $v \cdot i$

$$p = V_p I_p \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

Desenvolvendo obtém-se

$$p = \frac{1}{2} V_p I_p [\cos \phi - \cos(2\omega t - \phi)]$$



Transmissão de Energia Elétrica

Conceitos básicos de Transmissão em CA

$$p = \frac{1}{2} V_p I_p [\cos \phi - \cos(2\omega t - \phi)]$$

Como $V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$ e $I_{RMS} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$ obtém-se:

$$p = V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi - V_{RMS} I_{RMS} \cos(2\omega t - \phi)$$

A potência transmitida possui um valor médio $V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi$, modulado por uma componente pulsante frequência de 2ω . Durante determinados instantes a potência pode se tornar negativa, ou seja, o fluxo de energia durante estes instantes se processa na direção negativa.

Transmissão de Energia Elétrica

Conceitos básicos de Transmissão em CA

$$p = V_{RMS} I_{RMS} [\cos \phi - \cos(2\omega t - \phi)]$$

Deduzindo:

$$p = V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) - V_{RMS} I_{RMS} \sin \phi \sin 2\omega t$$

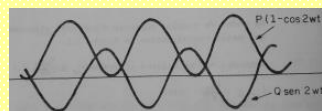
ou ainda:

$$p = P(1 - \cos 2\omega t) - Q \sin 2\omega t$$

A primeira parcela caracteriza uma onda com valor máximo P e mínimo zero. A segunda parcela, sendo puramente senoidal, tem valor médio nulo e representa portanto a componente de potência que não produz trabalho útil, constituindo-se na **energia reativa** necessária à transmissão de energia em corrente alternada.

Transmissão de Energia Elétrica

Conceitos básicos de Transmissão em CA



A transmissão de energia elétrica descrita anteriormente se processa fora dos condutores, através do campo magnético que envolve os mesmos.

Assim, embora a corrente elétrica seja criada e mantida dentro do condutor pela diferença de potencial aplicado a este, a transmissão de energia se efetua no meio externo ao condutor, sendo este uma condição de fronteira, um guia de onda.

Transmissão de Energia Elétrica

Conceitos básicos de Transmissão em CA

Esta energia não se distribui uniformemente no espaço ao redor dos condutores, embora possuindo uma densidade volumétrica que cresce a medida que crescem as intensidades dos vetores de campo elétrico e magnético.

Matematicamente esta transmissão de energia pode ser descrita pelo vetor de **Poynting**, \vec{P} :

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \text{W/m}^2$$

onde: E = intensidade do campo elétrico V/m

H = intensidade do campo magnético A/m

O vetor de Poynting representa a densidade direcional do fluxo de energia de um campo eletromagnético.

Transmissão de Energia Elétrica

Conceitos básicos de Transmissão em CA

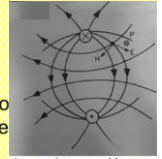
Assim, a energia eletromagnética se irradia por uma direção coincidindo com uma perpendicular ao plano formado pelos vetores \vec{E} e \vec{H} ; como estes vetores estão localizados em um plano perpendicular aos condutores o vetor \vec{P} estará na direção dos fios e terá por magnitude o valor: $P = E \cdot H \cdot \sin \gamma$

Sendo γ o ângulo entre E e H .

Dado que $\gamma = 90^\circ$, condição de ortogonalidade e

$$P = E \cdot H \quad \text{W/m}^2$$

Esta expressão, é análoga ao produto de tensão por corrente (potência), bastando que se integre a energia irradiada através de toda seção transversal da figura.



Campo eletromagnético ao redor de 2 condutores

Transmissão de Energia Elétrica

Energia armazenada no campo magnético de uma bobina

Considere um circuito RL série, sendo a tensão aplicada

$$v = V_p \sin \omega t \text{ a corrente será então } i = I_p \sin(\omega t - \phi)$$

A corrente eficaz $I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{Z}$ onde o módulo da impedância é $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$

A potência ativa pode ser expressa como: $P = V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi$

e a potência reativa como: $Q = V_{RMS} I_{RMS} \sin \phi$

$$\text{Assim } P = \frac{V_{RMS}^2 R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad \text{e} \quad Q = \frac{V_{RMS}^2 \omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$