

## 9.6 AC-DC

A mais importante aplicação dos transformadores se encontra na distribuição e no transporte de energia elétrica. É preferível usar alta tensão e baixa corrente na transmissão de energia elétrica por grandes distâncias, pois a potência gasta inutilmente na fiação vale  $R_{fiação} I^2$ , então se deve usar um valor baixo da corrente. Mas não podemos oferecer a energia elétrica nas casas com voltagens de dezenas ou centenas de quilovolt, (embora esta opção fosse resolver o maior problema atual da humanidade, a saber, a superpopulação da Terra). Então precisa transformar o formato da potência <alta tensão  $\times$  baixa corrente> para o formato <baixa tensão  $\times$  alta corrente> antes de entregar a energia nas casas. Esta é a principal razão pela qual a energia elétrica é distribuída em forma alternada, ou seja, como uma oscilação. Isto facilita a transformação dos formatos usando a lei de indução. Com uma voltagem constante, o processo de transformação teria que incluir uma conversão numa oscilação e, depois da transformação das voltagens, uma conversão da voltagem oscilatória para uma voltagem constante. Então o uso direto de corrente alternada é mais simples.

Costuma-se chamar tudo, tanto a corrente como a tensão, do sistema alternado de distribuição de energia elétrica de AC e tudo do sistema com tensão constante, de DC. Estas siglas vêm do inglês. AC significa “Alternating Current” e DC significa “Direct Current”. Esta nomenclatura é um tanto absurda parecendo inventada por pessoas que confundem corrente e voltagem. Por exemplo, encontramos nos multímetros uma faixa “V AC” (voltagem corrente alternada). Mas esta nomenclatura é agora tão difundida que não há chance de substituí-la por uma mais racional. Existe também uma tradução para o português desta nomenclatura infeliz; AC  $\rightarrow$  CA (corrente alternada) e DC  $\rightarrow$  CC (corrente contínua).

Fig. 9.6.1 Fiação numa rua brasileira com fornecimento de energia elétrica com o sistema trifásico.



Além da facilidade de transformação, há ainda uma outra razão para o uso do sistema AC. O leitor deve ter notado que nas linhas de transmissão de energia elétrica não passam apenas dois fios, um de ida e um de volta. Nas ruas das cidades brasileiras percebemos, fora de um fio sem isolamento dos postes, mais três fios pendurados nos postes por elementos de isolamento elétrica. A companhia elétrica fornece três oscilações com a mesma frequência, mas com

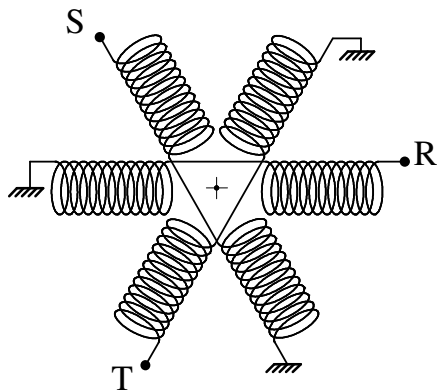
diferentes constantes de fase. Estas oscilações diferem por defasagens relativas de  $120^\circ$ , ou em radianos, por  $2\pi/3$ . Este sistema é conhecido como sistema trifásico, e os três fios são também chamados de três *fases*. Há ainda um quarto fio chamado de *neutro* e as tensões das três fases são definidas relativas a este fio neutro. Para que esta abundância de fios? Este sistema trifásico permite alimentar um tipo de motor elétrico muito usado em máquinas de grande porte.

A figura 9.6.1 mostra um exemplo de transmissão de energia elétrica na modalidade trifásica. Na fotografia aparece o fio neutro na esquerda grampeado diretamente no poste enquanto os três fios de fase estão fixas em corpos isolantes de porcelana.

Aparece ainda um transformador com um trocador de calor que serve para a retirada de energia dissipada. As tensões das três fases em relação ao fio neutro são

$$\begin{aligned} V_R(t) &= V_{ef} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi), \\ V_S(t) &= V_{ef} \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right), \\ V_T(t) &= V_{ef} \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \varphi\right), \end{aligned} \quad (9.6.1).$$

Vamos conhecer brevemente os motores trifásicos para entender a utilidade do sistema trifásico. Imagine três solenoides com uma lacuna no meio de cada solenoide para manter um espaço vazio. Os três solenoides diferem na sua orientação por um ângulo geométrico de  $120^\circ$  como mostra a figura 9.6.2.

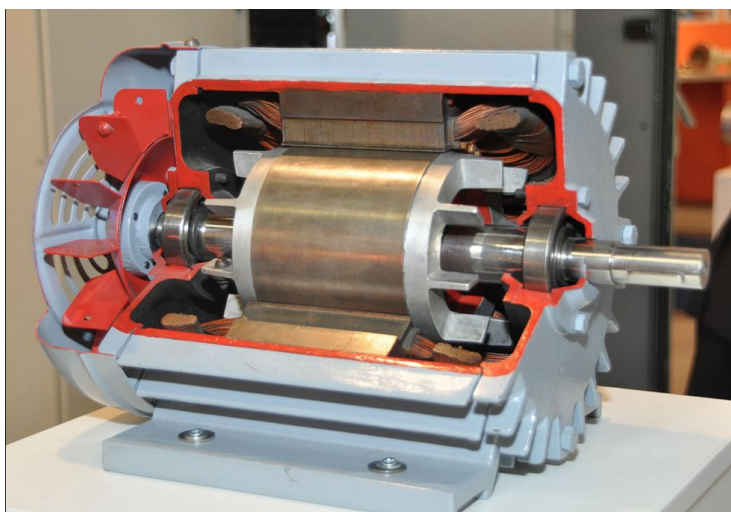


Quando se alimentam estas bobinas com três oscilações elétricas defasadas por  $120^\circ$ , gera-se um campo magnético na região central com módulo constante que gira com uma velocidade angular  $\omega$  igual à frequência angular das oscilações elétricas. Quando se coloca um condutor nesta região central, o atrito magnético põe este condutor em rotação. Pronto! Temos um motor! A grande vantagem deste tipo de motor é a ausência das escovas.

Fig. 9.6.2 Geração de um campo magnético giratório com três fontes oscilatórias defasadas de campo por  $120^\circ$  e orientados em direções que diferem por  $120^\circ$ .

Aqui na explicação do princípio do motor trifásico desenhei três solenoides compridos. Mas os motores reais usam uma geometria que ocupa menos espaços. A figura 9.6.3 mostra um motor trifásico por dentro.

Fig. 9.6.3 Motor trifásico, modelo didático aberto. Imagem da Wikipédia. Autor: S.J. de Waard, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17313755>



Este tipo de motor é frequentemente encontrado em maquinaria pesada na indústria e na agricultura. Em equipamentos modernos há ainda uma variante do uso da corrente trifásica para estes motores. Em vez de usar as três voltagens oscilatórias da companhia elétrica diretamente nas bobinas do motor, a energia fornecida é primeiramente convertida em três oscilações novamente com

$120^\circ$  de defasagem, mas com uma frequência diferente daquela da rede elétrica. Estas novas oscilações alimentam o motor permitindo assim velocidades de rotação livre

diferentes daquela prescrita pelas oscilações originais. Por muitos engenheiros brasileiros os conversores de frequência são chamados de inversores<sup>1</sup> de frequência.

Além de fornecer a fonte de alimentação dos motores sem escovas, o sistema trifásico mitiga um problema do sistema AC. Na seção 4.1 mencionamos o problema da falta de energia nos intervalos de tempo perto da passagem da voltagem por zero. Quando se consomem altas taxas de energia, estes “tempos de vacas magras” nem sempre podem ser preenchidos satisfatoriamente com energia armazenada em capacitores. Com três oscilações defasadas por  $120^\circ$  sempre há alguma voltagem diferente de zero num dos três fios.

Então o sistema AC tem a vantagem de facilitar a transformação e ele permite, na modalidade trifásica, alimentar motores sem escovas. Além destas vantagens, eletricidade AC apresenta riscos menores no caso de choque elétrico. Mas há também desvantagens. No transporte de energia por milhares de quilômetros os fios da linha de transmissão atuam como antenas e uma potência considerável é emitida para o espaço pela corrente oscilatória. Por esta razão as empresas de distribuição da energia elétrica optam por transmissão no formato DC quando as distâncias são muito grandes.

Há ainda um efeito físico interessante que causa perdas no transporte no formato AC por fiação extremamente grossa. O campo magnético oscilatório gerado pela corrente no fio induz correntes no fio que se sobrepõem à corrente original. Resulta uma distribuição de densidade de corrente não uniforme dentro do fio. Com altas frequências a corrente é praticamente expulsa do centro do fio e é confinada numa camada fina superficial, como se a corrente fluísse somente na “pele” do fio. Por esta razão este efeito é chamado de “efeito skin”, do inglês skin = pele. Então a parte central do fio contribui menos para a condução. Na frequência de 60 Hz para fios de alumínio de uns 20 mm de diâmetro, este efeito ainda não apresenta um problema apreciável. Mas para frequências mais elevadas ele pode prejudicar.

Finalmente há uma desvantagem do sistema AC que é provocada pelos usuários, ou melhor, pelos aparatos elétricos ligados pelos usuários. Os equipamentos alimentados com energia elétrica modificam a voltagem na fiação da rede elétrica, pois as nossas tomadas não são fontes ideais de voltagem. Estas modificações muitas vezes envolvem deformações da forma senoidal da voltagem. A voltagem continua uma função periódica com um período de  $1s/60$ , mas na decomposição de Fourier há frequências mais elevadas do que 60Hz. Aparecem frequências múltiplos desta frequência básica. Estes harmônicos podem causar problemas para equipamentos eletrônicos. Num sistema DC modificações da voltagem podem ser corrigidas facilmente com grandes capacitores. No sistema AC a “limpeza” da voltagem é mais complicada.

No primeiro parágrafo desta seção falamos que no sistema DC uma transformação de formatos da potência seria mais complicada, pois envolveria, além da transformação, duas mudanças de sistema elétrico; uma de DC para AC e uma de AC para DC. Quando o uso da energia elétrica começou em larga escala, estas mudanças  $DC \rightarrow AC$  e  $AC \rightarrow DC$  teriam sido realmente passos relativamente complicados. Mas com o avanço cada vez mais sofisticado de elementos semicondutores, a geração de oscilações e de alterações temporais de correntes se torna cada vez mais simples. Então é possível que o sistema AC comece a ser obsoleto em grande parte da distribuição de energia.

Especialmente com interruptores eletrônicos, como os transistores de efeito campo, pode-se realizar uma transformação

---

<sup>1</sup> Trata-se de uma total insensibilidade linguística das pessoas que usam esta expressão.

<alta tensão×baixa corrente> ↔ <baixa tensão×alta corrente>

eficientemente no sistema DC.

A figura 9.6.4 mostra a parte essencial de um transformador no sistema DC conhecido como “conversor buck-boost”. Durante um intervalo de tempo de duração  $T_a$  o interruptor  $A$  fica fechado e o interruptor  $B$  aberto. Neste intervalo (a), energia magnética é armazenada no indutor. Depois, os estados dos interruptores são trocados e durante um intervalo de tempo (u), de duração  $T_u$ , a energia estocada é usada para carregar um capacitor e para fornecer energia para um resistor do usuário. Aqui a continuidade da corrente em circuitos com indutor, cujos efeitos indesejáveis discutimos na seção 8.4, tem uma aplicação positiva.

Durante o intervalo de tempo (a) o resistor do usuário  $R_{us}$  é alimentado pelo capacitor. Os tempos  $T_a$  e  $T_u$  são escolhidos muito menores que os tempos  $R_{us}C$ ,  $\sqrt{LC}$  e  $L/R_{us}$ .

Vamos analisar este circuito quantitativamente para entender melhor a transformação de voltagem. Durante os intervalos de tempo de armazenamento (a), vale a lei das malhas

$$-\mathcal{E} = -L \frac{dI_a}{dt} \quad (9.6.2)$$

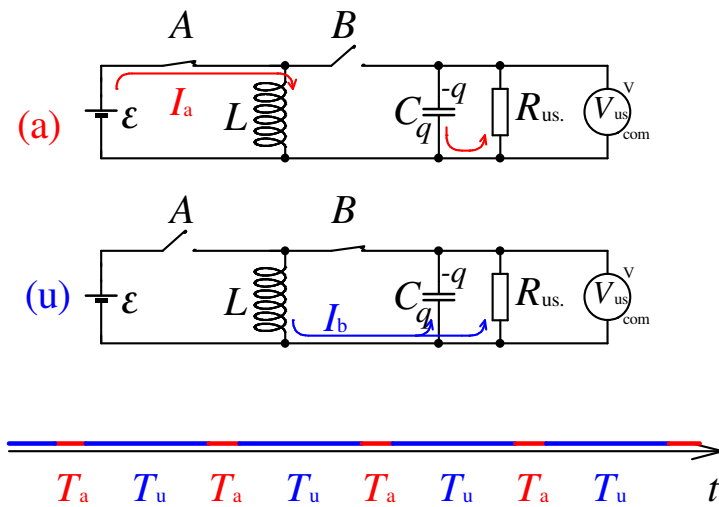


Fig. 9.6.4 Conversor buck–boost.

Na verdade teria no lado esquerdo ainda um termo  $RI_a$  sendo  $R$  a soma da resistência interna da bateria e da resistência do fio do indutor. Mas aqui vamos desprezar este termo, supondo que  $R$  seja muito pequeno. A equação (9.6.2) é facilmente integrada:

$$I_a(t) = I_a(t_n) + \frac{\mathcal{E}}{L} (t - t_n) \quad (9.6.3)$$

Nesta fórmula,  $t_n$  é o instante da última troca do regime (u) para o regime (a). No fim do intervalo de tempo (a), a corrente vale

$$I_a(t_n + T_a) = I_a(t_n) + \frac{\mathcal{E}}{L} T_a \quad (9.6.4)$$

Por causa da continuidade da corrente em circuitos com indutor, este valor será a corrente inicial  $I_u$  no início do intervalo (u). Durante o intervalo (u) vale a lei das malhas

$$\frac{q}{C} = -L \frac{dI_u}{dt} \quad (9.6.5).$$

Vamos supor um valor da capacitância extremamente grande de tal forma que a carga do capacitor quase não sofra alteração durante o curto intervalo de tempo (u). Então podemos tratar  $q/C$  como constante e vamos escrever este valor em termos da voltagem indicada pelo voltímetro, que está mostrado no circuito:

$$\frac{q}{C} = -V_{us} \approx const. \quad (9.6.6).$$

Então temos de novo uma equação de fácil integração:

$$I_{us}(t) = I_a(t_n + T_a) + \frac{V_{us}}{L} (t - (t_n + T_a)) \quad (9.6.7).$$

No fim do intervalo (u) temos a corrente

$$I_{us}(t_n + T_a + T_u) = I_a(t_n + T_a) + \frac{V_{us}}{L} T_u = I_a(t_n) + \frac{\mathcal{E}}{L} T_a + \frac{V_{us}}{L} T_u \quad (9.6.8).$$

Por causa da continuidade da corrente em circuitos com indutor, este valor será a corrente inicial  $I_a$  no início do próximo intervalo (a);

$$I_u(t_n + T_a + T_u) = I_a(t_n + T_a + T_u) = I_a(t_{n+1}) \quad (9.6.9).$$

O circuito chega a um regime estacionário. Neste regime, devemos ter  $I_a(t_{n+1}) = I_a(t_n)$ .

Então vale

$$\frac{\mathcal{E}}{L} T_a + \frac{V_{us}}{L} T_u = 0 \quad (9.6.10).$$

Conseqüentemente a voltagem vista pelo usuário é

$$V_{us} = -\mathcal{E} \frac{T_a}{T_u} \quad (9.6.11).$$

Então este transformador de voltagem DC muda o sinal da voltagem e pode gerar voltagens que são em módulo maiores ou menores que a eletromotância da bateria. O valor pode ser escolhido eletronicamente pelo controle dos tempos  $T_a$  e  $T_u$ .

A análise feita parte do pressuposto de que a chave  $B$  feche no exato momento em que a chave  $A$  abra. Sabemos que qualquer processo tem suas imprecisões. O que acontece se a chave  $B$  fechar um pouco depois da abertura da chave  $A$ ? Neste caso teríamos a situação desagradável de geração de alta tensão que discutimos na seção 8.4. Lá vimos que a continuidade da corrente pode causar choques em pessoas ou destruir transistores. Aqui este fenômeno poderia destruir um dos interruptores  $A$  ou  $B$ . É fácil evitar esta situação. Basta colocar um diodo paralelo ao interruptor  $B$  como mostra a figura 9.6.5

Pode-se até substituir o interruptor  $B$  totalmente pelo diodo. Mas para conversores de altíssima eficiência energética vale manter a chave  $B$ , pois no diodo fica uma pequena queda de tensão que causa perdas de energia. Eficiência energética de um transformador

é o quociente da potência retirada da parte secundária e da potência que entra na parte primária.

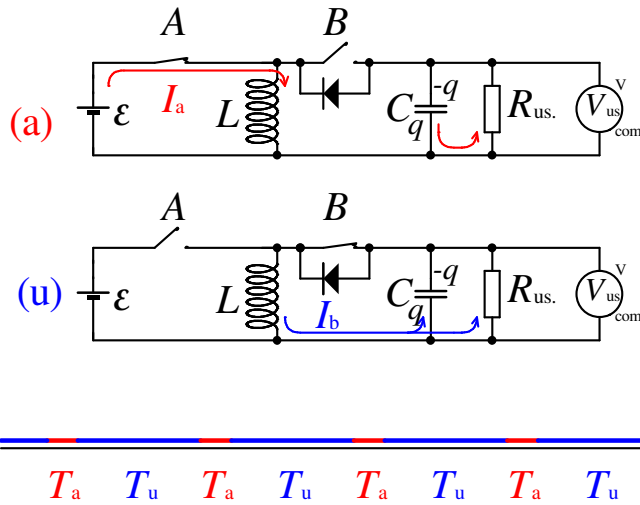


Fig. 9.6.5 Conversor buck-boost com diodo de proteção.

A eficiência energética dos conversores buck-boost fica tipicamente menor que 80%, mas pode chegar a valores altos como 97%. Aliás, as eficiências energéticas dos transformadores comuns do sistema AC de 60 Hz pode ter valores bem variadas. Os pequenos transformadores para potência de 1 W muitas vezes têm eficiências

energéticas menores que 50% enquanto os grandes transformadores usados pelas companhias de distribuição de energia elétrica podem ter eficiências energéticas que ultrapassam 99%.

### Exercícios:

**E 9.6.1:** O campo magnético na região central das três bobinas da figura 9.6.2 é a soma de três parcelas:

$$\begin{aligned} \vec{B}(t) &= \vec{B}_R(t) + \vec{B}_S(t) + \vec{B}_T(t) \quad \text{com} \\ \vec{B}_R(t) &= b \hat{x} \cos(\omega t) \\ \vec{B}_S(t) &= b \cos\left(\frac{1}{3}2\pi\right) \hat{x} \cos\left(\omega t + \frac{1}{3}2\pi\right) + b \sin\left(\frac{1}{3}2\pi\right) \hat{y} \cos\left(\omega t + \frac{1}{3}2\pi\right) \\ \vec{B}_T(t) &= b \cos\left(\frac{2}{3}2\pi\right) \hat{x} \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}2\pi\right) + b \sin\left(\frac{2}{3}2\pi\right) \hat{y} \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}2\pi\right) \end{aligned} \quad (9.6.12)$$

Mostre que este campo pode ser escrito com  $\vec{B}(t) = B \hat{u}(t)$ , com um valor constante  $B$  e um vetor unitário  $\hat{u}(t)$  que gira no plano  $xy$  com velocidade angular  $\omega$ . Determine o valor da constante  $B$  em termos da constante  $b$  e determine o sentido de rotação do vetor  $\hat{u}(t)$ . O que acontece com o campo  $\vec{B}(t)$  se trocarmos o papel das fases  $S$  e  $T$ , ligando a fase  $S$  na bobina que antes estava conectada na  $T$  e a fase  $T$  na bobina que estava ligada na fase  $S$ ?

**E 9.6.2:** Três resistores iguais são ligados nas três fases da rede trifásica com uma das pernas do resistor. As outras pernas são ligadas juntas no fio neutro como mostra a figura 9.6.6. Quanto vale a corrente  $I_0$  no fio neutro?

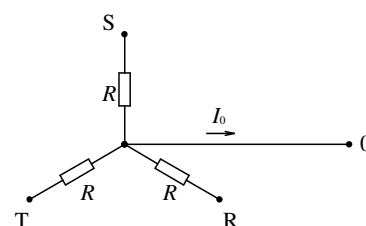


Fig. 9.6.6 Circuito estrela.

**E 9.6.3:** (a) Na Alemanha o sistema trifásico entra nas casas com uma tensão eficaz entre quaisquer duas das três fases de 400 V. Quanto vale a tensão eficaz entre uma das fases e o fio neutro? (b) Um aquecedor de água instalada numa casa neste país entrega uma potência de 18 kW para a água. Neste aquecedor há três resistências iguais ligadas num triângulo cujos vértices são ligados nas três fases como mostra a figura 9.6.7. Sabemos que os três resistores têm o mesmo valor de resistência, mas não conhecemos este valor. Quanto vale a corrente (valor eficaz) em cada fase?

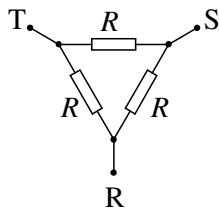


Fig. 9.6.7 Circuito delta.