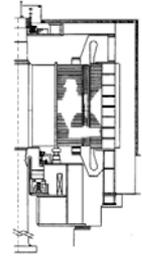


Sistemas Electromecânicos

2007/2008

Elementos do Método de Potier

O comportamento em carga da máquina síncrona trifásica em regime permanente sinusoidal e simétrico, é afectado pela existência de um campo magnético de reacção do induzido, campo magnético provocado pela passagem da corrente eléctrica de carga nos condutores do circuito do induzido. A presença do campo magnético do induzido provoca a distorção no espaço do campo magnético criado pela passagem da corrente de excitação no enrolamento indutor.



Os campos magnéticos presentes no entreferro da máquina podem ser representados pela força magnetomotriz (F) que os cria, devido à condição de linearidade para as propriedades do circuito magnético estabelecida nas condições de estudo (4). Atendendo ao tipo de enrolamento utilizado em cada circuito da máquina síncrona a força magnetomotriz criada vai ser proporcional ao número efectivo de espiras do respectivo enrolamento, vai ter uma variação sinusoidal no espaço e vai depender do ângulo de esfasamento espacial (direcção) entre as diversas ondas.

Conforme a situação de carga, definida pela amplitude da corrente eléctrica (I) e pelo ângulo de esfasamento da corrente sobre a força electromotriz (ψ), é possível caracterizar qualitativamente o fenómeno da reacção do induzido.

carga eléctrica puramente óhmica

a intensidade da corrente eléctrica de carga está em fase com a força electromotriz ($\psi = 0$), e o campo de reacção do induzido que é perpendicular ao campo magnético indutor, tem sobre este uma acção fraca: é um campo magnético de reacção *transversal* (ou em quadratura).

carga eléctrica puramente indutiva

a intensidade da corrente eléctrica de carga está em atraso de fase de $\pi/2$ com a força electromotriz, e o campo de reacção do induzido opõem-se ao campo magnético indutor: é um campo magnético de reacção longitudinal (ou *directa*) *desmagnetizante*.

carga eléctrica puramente capacitiva

a intensidade da corrente eléctrica de carga está em avanço de fase de $\pi/2$ com a força electromotriz, e o campo de reacção do induzido conjuga-se com o campo magnético indutor: é um campo magnético de reacção longitudinal (ou *directa*) *magnetizante*.

carga eléctrica qualquer

a intensidade da corrente eléctrica de carga está esfasada de um ângulo ψ com a força electromotriz, e será decomposta na sua componente activa, responsável pelo campo transversal, e pela componente reactiva responsável pelo campo de reacção directa (magnetizante ou desmagnetizante).

"...para todo o esfasamento φ , a reacção do induzido pode ser considerada como a resultante duma reacção directa devida à corrente reactiva e duma reacção transversal devida à corrente activa"

A. Blondel, 1899

$$\underline{U} = \underline{E} + R \cdot \underline{I} + j\omega L_d \cdot \underline{I} \cdot \sin \varphi + j\omega L_q \cdot \underline{I} \cdot \cos \varphi$$

Numa máquina síncrona em carga existirá uma força magnetomotriz do circuito indutor (F_i), uma força magnetomotriz do circuito induzido (F_I) e da composição das duas existirá uma força magnetomotriz resultante (F_r) — que se supõe criada por uma corrente I'_e que circula no circuito indutor.

Cada uma das força magnetomotrizes são responsáveis pelo aparecimento de um campo magnético girante, devido à máquina ser síncrona e ser trifásica; por isso as três ondas de força magnetomotriz deslocam-se no entreferro à mesma velocidade angular (a velocidade de sincronismo) e distam entre si $2\pi/3$ rad elec!

Como a variação no tempo das forças magnetomotrizes é sinusoidal, elas podem ser representadas por fasores, e estabelecendo a relação fasorial entre elas,

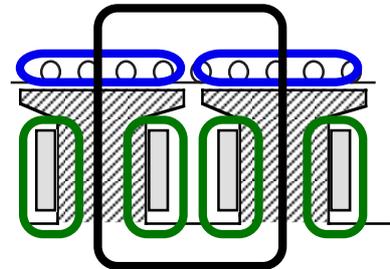
$$F_i + F_I = F_r \text{ ou considerando o número efectivo de espiras } N_i \cdot I_e + N_I \cdot I = N_i \cdot I'_e$$

ou ainda, definindo a corrente I''_e — em que $I''_e = (-N_I/N_i) \cdot I$ — como uma componente da corrente de excitação que passa no circuito indutor e que equilibra o efeito magnético da reacção do induzido,

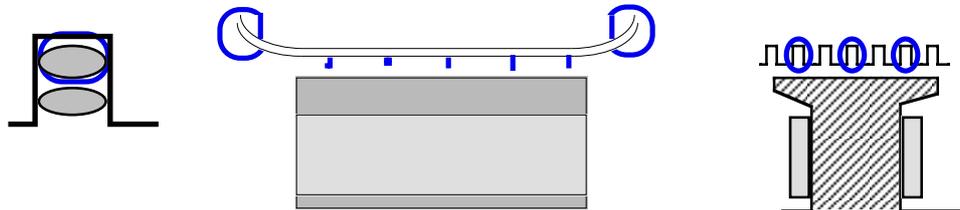
$$I_e = I_e + I''_e$$

Numa situação em que a máquina síncrona está em carga surgirá uma distribuição de campos magnéticos no entreferro da máquina com campos magnéticos de fugas um campo magnético indutor resultante da composição do campo indutor com o campo de reacção do induzido:

- um campo magnético que só envolverá o enrolamento indutor (é o campo de fugas do indutor)
- um campo magnético que só envolverá o enrolamento do induzido (é de fugas a respeito do circuito do induzido). Este campo tendo a maior parte do trajecto pelo ar, pode ser substituído por uma indutância fictícia (de parâmetros concentrados) que origina uma força electromotriz com a variação no tempo da intensidade da corrente no circuito eléctrico igual à força electromotriz que é induzida pelo campo resultante. Como a variação é sinusoidal, a representação fasorial das grandezas eléctricas permite substituir essa força electromotriz por uma queda de tensão numa reactância — a *reactância de fugas do circuito induzido* X_l .



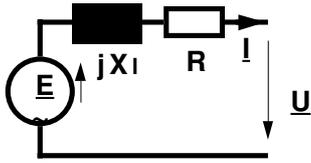
{Nota: para o campo magnético de fugas do circuito induzido contribuem — campo de fugas das ranhuras, campo de fugas nos extremos das bobinas, e o campo magnético de fugas no entreferro (fugas em zig-zag)}



- um campo magnético que envolve as espiras dos enrolamento induzido e do enrolamento indutor — é o campo magnético resultante da distorção do campo magnético indutor pelo campo magnético de reacção do induzido. Este campo é responsável pela força electromotriz E , em cada fase da máquina.

O circuito eléctrico equivalente do Alternador Síncrono Trifásico, em regime permanente

sinusoidal síncrono, tem a forma apresentada; a máquina rege-se pelas duas equações fasoriais que podem ser representadas pelos respectivos diagramas fasoriais.

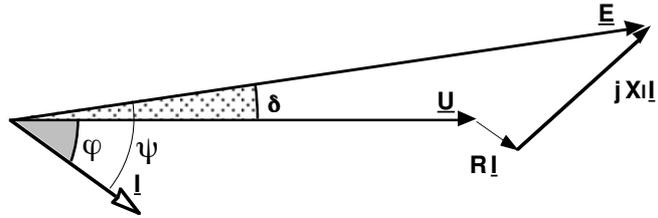
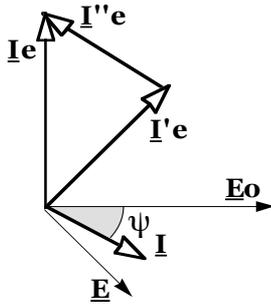


$$I_e = I'e + I''e$$

$$E = U + R \cdot I + j\omega L_l \cdot I = U + R \cdot I + jX_l \cdot I$$

$$I_e = I'e + I''e$$

$$E = U + R \cdot I + jX_l \cdot I$$



{note que há exagero e desproporcionalidade nas dimensões dos fasores!}

Método de Potier

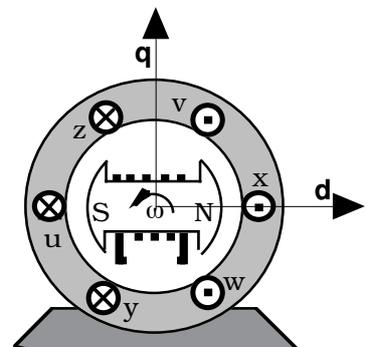
É um método indirecto e experimental de determinação de parâmetros — *reactância de fugas do induzido (ou reactância de Potier) e a força magnetomotriz de reacção do induzido* (ou a sua representação pela intensidade de corrente $I''_e = (-N_l/N_i) \cdot I$, a componente da corrente de excitação que passa no circuito indutor e que equilibra o efeito magnético da reacção do induzido) — parâmetros que permitem determinar as condições de funcionamento — como a característica de tensão $U = U(I_f)$ para uma situação de carga eléctrica constante, e a característica de regulação $I = I(I_f)$ para uma situação de tensão e factor de potência constante.

Para aplicar o Método de Potier torna-se necessário conhecer alguns pontos da característica de carga indutiva pura {incluindo a situação de tensão nominal, intensidade de corrente de carga nominal com factor de potência nulo}, o que implica o estudo do Alternador Síncrono Trifásico na situação de carga indutiva pura.

Carga indutiva pura

Partindo do modelo matemático para o Alternador Síncrono Trifásico, durante o ensaio em carga indutiva pura ($I = I_n$ e $\lambda = \cos \varphi = 0$), verifica-se que:

$$U = E + R \cdot I + jX_l \cdot I$$



- $I = I_n$ e $\lambda = \cos \varphi = 0$ logo $\underline{I} = -j\underline{I}$;
- é desprezável a queda de tensão óhmica face à queda de tensão reactiva $R I_n \ll X I_n$
 Para máquinas com uma potência activa superior a 100 ou a 200 kW, a resistência é suficientemente pequena para que possa ser desprezada.
- é nula a componente activa da corrente de carga e não existe campo de reacção transversal;

assim

$$\underline{U} = \underline{E} + \underline{R} \cdot \underline{I} + jX_1 \cdot \underline{I} = \underline{E} + jX_1 \cdot (-j \cdot I) = \underline{E} + X_1 \cdot I$$

logo a tensão está em fase com a força electromotriz;

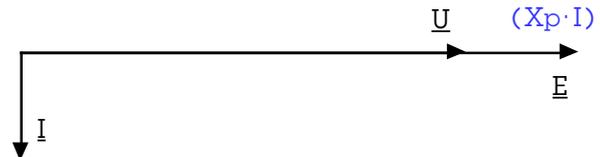
porque resulta da soma de uma grandeza escalar ($X_1 \cdot I$) a uma grandeza fasorial (\underline{E})

a equação que rege o funcionamento do alternador nesta particular situação ($\lambda = \cos \varphi = 0$) reverte para uma equação escalar $\rightarrow U = E + X_1 \cdot I$ ou $U = E + X_p \cdot I$.

Nesta equação $U = E + X_p \cdot I$, a reactância de Potier X_p ou a reactância de fugas do induzido X_1 representa a acção desmagnetizante do campo de reacção do induzido.

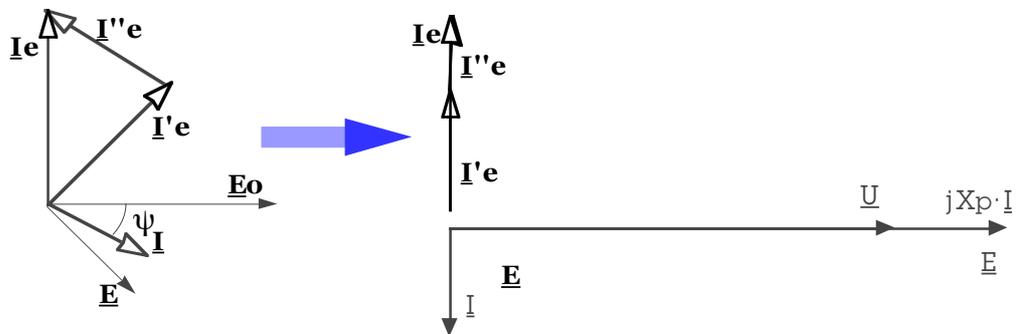
Isto é: com a passagem da intensidade de corrente I_n na situação de carga indutiva pura o campo de reacção é desmagnetizante e há uma diminuição do campo magnético resultante a que corresponde uma diminuição da tensão nos terminais da máquina relativamente à situação de ausência de carga (vazio) igual a $(X_1 \cdot I_n)$ {efeitos magnéticos da reacção do induzido}.

O correspondente diagrama fasorial é:



A equação fasorial que rege a ligação entre as diferentes forças magnetomotrizes consideradas na situação de carga, e representada pela equação fasorial ligando as correntes no circuito indutor $I_e = I'_e + I''_e$, também passa a ser representada por uma equação escalar quando a queda de tensão óhmica é desprezável face à queda de tensão reactiva ($R I_n \ll X_1 I_n$).

{Nota: claro que o desprezo da queda de tensão óhmica é uma aproximação que permite atender ao diagrama fasorial e verificar que sendo a equação de tensões escalar, e que a corrente de excitação I_e será representada por um fasor perpendicular à força electromotriz E , e que a corrente I''_e será representada por um fasor com o sentido contrário ao fasor representativo de I_n , nestas condições a representação fasorial só poderá ocorrer com todos os fasores assentes sobre uma mesma direcção, a de I_n ; logo a equação poderá ser escalar}



Aplicação

Nos ensaios económicos de um alternador trifásico de 15 MVA, com uma tensão nominal de $\sqrt{3} \cdot 11$ kV, e 50 Hz, recolheram-se em ensaio experimental os seguintes dados:

f.m.m./polo [k A esp]	0	10	18	24	30	40	45	50
E ₀ [kV]	0	4,8	8,4	10,1	11,5	12,8	13,3	13,65
U [kV] I=I _n ; cos φ =0			0				10,2	

Pretende-se determinar a regulação para uma situação de tensão simples de 11 kV com factor de potência 0,8 indutivo.

...

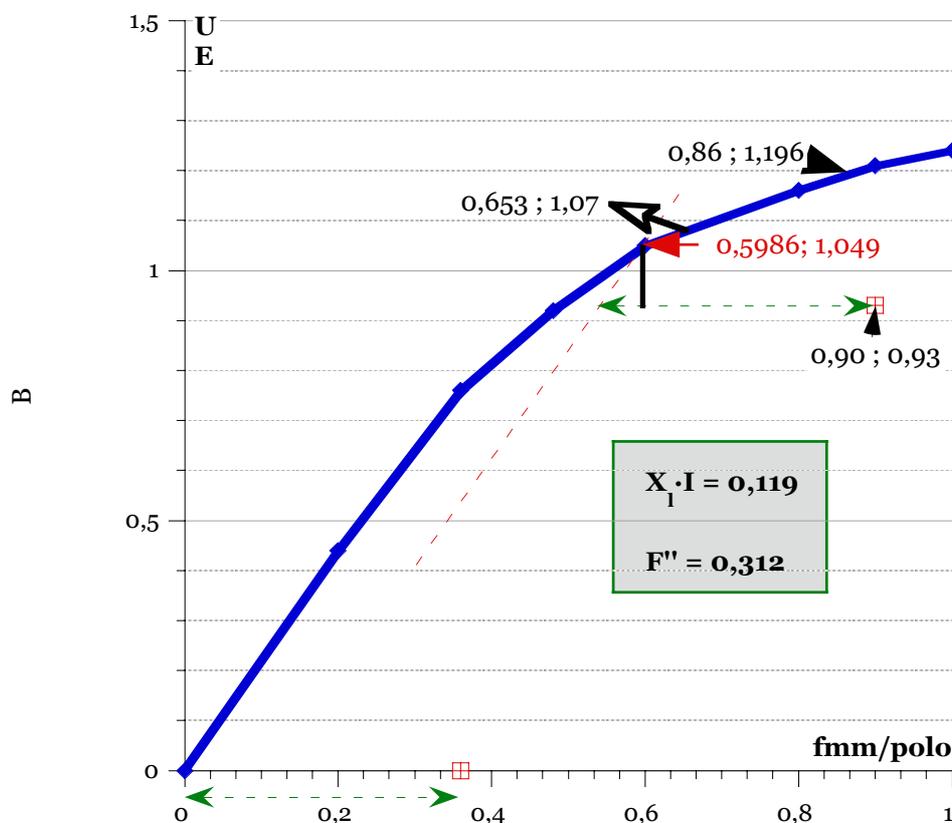
Segundo a orientação das Normas utilizam-se valores por unidade (p.u.). Para U_D = U_{NS} = 11 kV; F_D = 50 kAesp/polo.

f.m.m./polo [p.u]	0,0	0,2	0,3	0,48	0,6	0,8	0,9	1
E ₀ [pu]	0,00	0,44	0,76	0,92	1,05	1,16	1,21	1,24
U [pu] I=1; cos φ =0			0				0,93	

Com auxílio de um programa comercial de traçado de gráficos podem-se traçar a característica interna, o ponto da característica de tensão em função da corrente de excitação para uma carga nominal e indutiva pura. Fica-se ainda a conhecer o ponto da característica de curto-circuito.

Nota: convém escolher uma escala rigorosa —

[fmm/polo] 5 A/cm; [tensão ou fem] 1 kV/cm; [I_{cc}] 0,1 kA/cm ou
 [fmm/polo] 1 <—> 10 cm; [tensão ou fem] 1,5 <—> 10 cm



Como resultado da construção do triângulo de Potier, utilizando facilidades do programa quanto à leitura de valores do gráfico, obtém-se $X_l \cdot I = 0,119$ e $F'' = 0,312$.

Note que se tomou para valor base da força magnetomotriz F o valor máximo fornecido ($F_D = 50$ kAesp/pólo): No entanto a norma aconselha a tomar o valor da força magnetomotriz F que, em vazio, gera uma força electromotriz igual à tensão nominal ($F \longleftrightarrow E = U_n$ ou $E = U_n = 1$, em pu).

Agora podia-se resolver o problema — determinar a força electromotriz que realmente se desenvolve na máquina quando está à plena carga com factor de potência 0,8 indutivo — por via analítica, mas atendendo ao diagrama fasorial, (o que facilita o estabelecimento das equações).

$$\cos(\varphi) = 0,8 ; \sin(\varphi) = 0,6 \text{ e } \varphi = 46,8^\circ (0,644 \text{ rad})$$

$$E \cdot \cos \delta = X_l \cdot I \cdot \sin \varphi + U_n \quad (\text{--- projecção segundo a direcção de } \underline{U})$$

$$E \cdot \sin \delta = X_l \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{--- projecção segundo a direcção perpendicular a } \underline{U})$$

$$\operatorname{tg} \delta = (X_l \cdot I \cdot \cos \varphi) / (X_l \cdot I \cdot \sin \varphi + U_n)$$

ou

$$\operatorname{tg} \delta = (0,119 \times 0,8) / (0,119 \times 0,6 + 1) = 0,089$$

$$\delta = 5,086^\circ ; (0,089 \text{ rad})$$

$$E = (X_l \cdot I \cdot \cos \varphi) / (\sin \delta) \text{ ou } E = 1,077 \text{ (pu)}$$

Lendo na característica interna $E(F)$ retirava $F' = 0,653$ (pu).

Poderia agora traçar o diagrama fasorial das forças magnetomotrizes {ver Carlos Castro Carvalho; Máquinas Síncronas, p. 139, fig 98 } — $\underline{E}_e = \underline{F}'_e + \underline{F}''_e$ — e considerando a projecção segundo duas direcções perpendiculares, escrever

$$F \cos \alpha = F' + F'' \cos ((\pi/2) - \varphi - \delta) \cdot U_n \quad (\text{--- projecção segundo a direcção de } \underline{E})$$

$$F \sin \alpha = F'' \cdot \sin ((\pi/2) - \varphi - \delta) \quad (\text{--- projecção segundo a direcção perpendicular a } \underline{E})$$

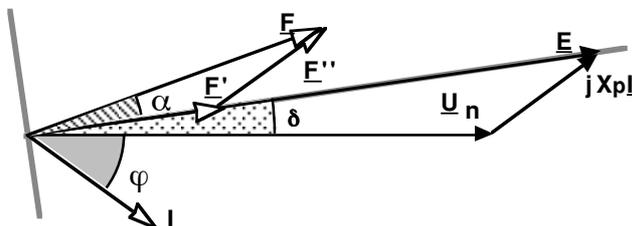
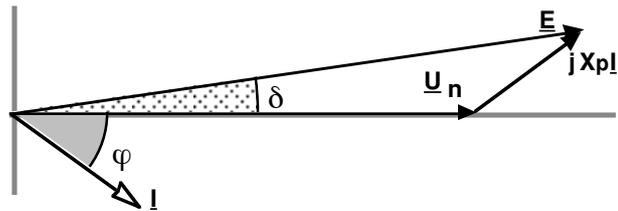
$$\operatorname{tg} \alpha = 0,005 \quad [\alpha = 0,286^\circ ; \alpha = 0,271 \text{ rad}]$$

$$F = 0,866 \text{ (pu)}$$

Lendo para $F = 0,866$ em $E(F)$ resulta que $E = 1,196$ (pu)

Assim,

$r = ((E - U_n) / U_n) \times 100\% = 19,6\%$ --- a regulação, obtida pelo Método de Potier, na situação de plena carga com factor de potência 0,8 indutivo é 19,6%.



Máquinas Eléctricas

1900

Resenha Histórica

Método de Potier



Alfred Potier (1840 - 1905)

Alfred Potier foi aluno da École Polytechnique (1857) e da École de Mines de Paris (1862) tendo sido assistente da cadeira de Física nos cursos preparatórios da École Polytechnique até que em 1881 se tornou professor catedrático.

Desde 1863 desempenhou funções de Engenheiro de Minas.

Para além do seu serviço, dedicou-se aos estudos científicos principalmente à Física Matemática. Dedicou-se ao desenvolvimento dos trabalhos de Fresnel — sobre a Difracção da Luz Polarizada e sobre a Reflexão Elíptica.

Em Termodinâmica estudou aspectos da teoria mecânica do calor.

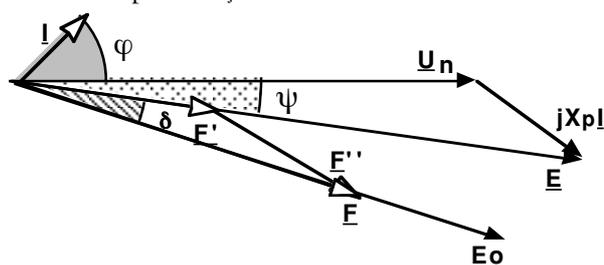
A partir de 1881 esteve associado a diferentes comissões que se ocuparam de diversos aspectos de Aplicação da Electricidade, e desde essa época dedicou-se aos problemas da Electricidade.

No campo das Medidas Eléctricas ajudou a fixar a definição de novas unidades (como em 1881), e inventou um método de medida da energia consumida em corrente alternada (sinusoidal e não-sinusoidais).

Em 1887 a École de Mines introduziu o estudo da Electricidade e das suas aplicações e Alfred

Potier regou esse curso até à sua reforma. Divulgou os trabalhos de Maxwell tendo publicado algumas notas com grande interesse.

Em 1899, juntando-se a uma preocupação geral sobre o problema da reacção do induzido nos alternadores, Alfred Potier apresentou o seu Método, que sendo simples quando se considera afastada a saturação exige um profundo cuidado quando na realidade ocorre saturação do ferro e variação cíclica das reactâncias do induzido; Apesar disso o seu Método permite resolver o problema com uma aproximação aceitável.



Em 1900 apresentou uma teoria algébrica completa sobre o funcionamento dos motores assíncronos no Congresso de Física.

Em 1891 foi recebido na Secção de Física da Academia das Ciências.