



SCE/007

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

STE II

SESSÃO TÉCNICA ESPECIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

NOVA METODOLOGIA PARA A OTIMIZAÇÃO DE MOTOR DE INDUÇÃO POLIFÁSICO

Roberto Meza Cubilla  
UNIOESTE

RESUMO

A metodologia desenvolvida, pode ser aplicada, de princípio, para qualquer sistema, desde que os dados de entrada sejam bem definidos, isto é, as equações que regem o fenômeno a ser otimizado. Para este caso específico, onde se encontra uma das suas aplicações, o procedimento determina, a partir de um projeto inicial (PI), o motor de indução qualquer, definido pelos projetos (P1, P2, ...) com menor custo de material ativo que, com uma dada laminação, obedece a limites de desempenho estabelecidos pelo projetista.

**PALAVRAS CHAVE:** Otimização, Máquina de Indução, Programação Linear.

1.0 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 Introdução

Entre os dispositivos eletromagnéticos de maior uso na indústria, nos eletrodomésticos, etc., encontram-se as máquinas de indução polifásicas. A aplicabilidade, a robustez, o baixo custo e ausência de manutenção dos motores de indução polifásicos, coloca-o, em primeiro lugar quanto ao responsável pelo maior consumo da energia elétrica.

Existe uma necessidade urgente da utilização mais inteligente da energia elétrica, através do adequado dimensionamento dos sistemas. Igualmente, a possibilidade de otimizar, isto é, baratear o custo, mantendo a mesma performance requerida dos equipamentos eletromagnéticos em geral.

A grande finalidade é a de diminuir o consumo, tornar mais leve o produto, bem como a sua miniaturização. Da mesma forma, elevar a competitividade das empresas brasileiras do ramo e criar a consciência das

vantagens da utilização de equipamentos mais eficientes (2).

2.0 – PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

O processo se desenvolve através de sucessivas otimizações parciais. A cada etapa, faz-se um teste, isto é, verifica-se o fator deficiência, que define a função a ser minimizada. Se a deficiência for (ou passar a ser) menor do que 1 (um), o custo é função a ser minimizada; caso contrário é a função deficiência.

Em cada otimização parcial, uma solução é obtida através da soma de todos os projetos diferenciados. Todas as variáveis ficam dentro dos limites estabelecidos, isto é, dentro dos valores impostos (condições de contorno ou de fronteira), com o custo mínimo. Isto se dá, pela combinação linear de vários projetos situados em torno de um ponto (projeto inicial) central no Hipertetraedro Regular (1).

O peso de cada projeto nessa combinação, pode ser obtido por programação linear (3). Os pesos positivos provocam uma solução dentro do Hipertetraedro dos cálculos anteriores. E quando negativo, fica fora do mesmo. Para cada limite dado (ou imposto – condições iniciais) é formulada uma inequação. A título de exemplo: o conjugado máximo,  $C_{m\acute{a}x} \leq a$ ; corrente de partida,  $I_p \leq b$ , etc. Onde  $a$  e  $b$  são constantes quaisquer.

Se a otimização tende para uma determinada direção, serão eliminados os projetos de peso nulo, estabelecendo-se outros projetos que geram novas fronteiras. A distância entre esses projetos fica definida pelo valor do *passo*, fornecido pelo usuário. Em função da solução encontrada (1ª. Otimização parcial – primeiro passo) um novo conjunto de projetos são

definidos, ou então deduz-se que este último conjunto contém a melhor solução para um dado passo. Deste modo passa-se à etapa seguinte, com novo *passo*, se houver, caso contrário, a solução final foi encontrada.

As arestas do Hipertetraedro, como pode ser visto na figura 1, são formadas pela contribuição de cada variável 'restrições' no custo (preço) do motor. Isto é, como exemplo, o custo como função de várias restrições:  $Custo=f(C_{máx}, C_p, I_p, Perdas,...)$ . Onde  $C_p$  é o conjugado de partida;  $I_p$  a corrente de partida, etc. Os projetos, definidos pelos seus valores limites, estão dispostos nos vértices do corpo geométrico. Em cada ponto de desempenho, podem ser estabelecidos limites para as seguintes *variáveis independentes* (ou restrições):  $C_n$ , conjugado útil;  $s$ , escorregamento;  $I_l$ , corrente de linha; para motores monofásicos:  $I_p$ , do enrolamento principal;  $I_a$ , do enrolamento auxiliar;  $V_{ze}$ , tensão no capacitor (externo);  $B_{máx}$ , indução máxima;  $J_i$ , densidade de corrente; nos enrolamentos:  $J_p$ , principal;  $J_a$ , auxiliar,  $J_{an}$ , no anel e na barra do rotor,  $J_{ba}$ ,  $P_{tot}$ , perdas totais.

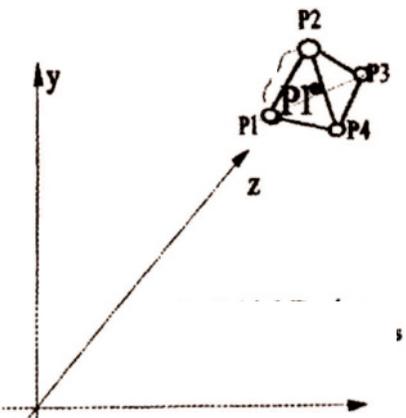


FIGURA 1.- Posição do projeto inicial, onde os demais projetos estão dispostos nos vértices em função dos seus pesos, bem como o passo.

O número de pontos de desempenho, isto é, 100% de carga, conjugado máximo, rotor bloqueado ou a vazio, por exemplo, são arbitrários. Cada um será definido: pelos valores da linha: frequência  $f$ , tensão  $V$ ; - pela temperatura dos enrolamentos: estator  $T_e$  e rotor  $T_r$ ; pelas ligações: tensão de desempenho/tensão nominal; pela curva de carga: conjugado  $T \times R$  rotação.

### 2.1 Etapas do Processo

O processo se realiza em até três etapas, cada qual associada a um *passo* (dado em valor percentual). Cada etapa parte de um projeto inicial (fornecido pelo projetista), que após sucessivas otimizações, chega a um projeto (solução) final; este passa a ser, então, o projeto inicial, da etapa seguinte (com passo menor). A solução final da última etapa, é o projeto Otimizado.

## 3.0 – ESTUDO DE CASOS

As variáveis devem ser dadas em valores relativos aos do projeto inicial. Os enrolamentos podem ser numerados consecutivamente de 1 até no máximo 5, na seguinte ordem: principal, complementar(es), auxiliar normal e auxiliar 'backlash'. Deve também suportar em no máximo dois capacitores. Como se dá, por exemplo, no caso monofásico, capacitor de dois valores: partida e permanente. Quando não há limite para a variável correspondente terá o valor zero.

### 3.1 Funções e Cálculo de Fatores

As *funções objetivas*, são funções a serem minimizadas, a saber:  $C_{mat}$ , o custo do material ativo (ferro, cobre, alumínio e capacitor). Sempre valor relativo ao do projeto inicial,  $Def$ , é o quociente do valor da variável pelo valor limite, a maior das deficiências de qualquer variável será a solução. Deficiência  $> 1$ , variável acima do limite, isto é, limite não obedecido; quando igual a 1, variável no limite com peso de sombra não nulo.

*Valor*: dado sempre em relação ao do projeto inicial para as variáveis independentes e o custo, ou em relação ao limite, para os demais.  $P_{rsbr}$ : preço de sombra.

### 3.2 Exemplos

$\partial C_{mat} / \partial C_{máx} = \Delta C_{mat} / \Delta C_{máx} = \Delta C_{mat} / \Delta I_p, \dots$ , corresponde à relação entre a variação percentual da função objetiva ( $Def$  ou  $C_{mat}$ ) e a variação percentual do limite em questão com sinal trocado. Assim, o preço de sombra de  $P_{tot}=0.5$  significa que um aumento nas perdas totais para o ponto de 1%, acarreta uma redução de custo de 0,5%. Para as variáveis com folga [ $var < 1$ ], o preço de sombra é nulo (4, 5 e 6).

O cálculo de fatores de cobre correspondentes a cada passo de bobina se baseia em enrolamentos senoidais; a relação entre os fatores calculados para o enrolamento senoidal e real, com mesmo número de espiras efetivas, define este valor de folga  $F_f$ , que vale aproximadamente 1,05. Os fatores de cobre  $F_{Cu}$ , nas diversas ranhuras, são limitados pelo fator do enchimento  $F_{ench}$ , que acima de um determinado valor:  $F_{ench} = S_{Cu} / S_{ranh}$ , poderá ser impraticável. Onde  $S_{Cu}$  é a seção do cobre e  $S_{ranh}$  a seção líquida da ranhura. O seu valor deve ser indicado em relação ao fator de cobre limite, definido por:  $F_{Cum}$  vezes  $F_f$ , dado pelos usuários. Onde o  $F_{Cum}$  é o fator de cobre máximo. Se no procedimento não se consegue achar uma solução exequível, isto é, que obedeça a todos os limites, a solução de menor deficiência será dada (7, 8, 9, 10, 11 e 12).

### 3.2 Variáveis Independentes

As variáveis controladas pelo processo de otimização são as chamadas variáveis independentes. Seu conjunto define um projeto (ou solução). Estas variáveis são:

$L$ : comprimento do pacote;

$S_a$ : seção do anel;

$Z$ : número de espiras efetivas;

$S_c$ : seção do condutor de cada enrolamento. Os enrolamentos podem ser dados nas seguintes ordens, principal [P], complementar [C] e auxiliar [A];

$C_{ext}$ : capacidade dos capacitores externos (no máximo dois capacitores).

Cada variável independente pode ser limitada inferior e/ou superiormente, ou ainda, permanecer fixa. Os limites devem ser fornecidos sempre em relação ao valor do projeto inicial. Assim, sempre o valor mínimo será  $\leq 1$  e o valor máximo  $\geq 1$ , isto é, se o valor mínimo for igual a 1 (um) e o valor máximo também igual a 1 (um), a variável independente é considerada fixa, não entrando no processo de otimização. Para desconsiderar um limite inferior ou superior, basta anular o valor correspondente. Mesmo para o enrolamento auxiliar desligado, pode ser estabelecido limite para  $V_{ze}$ , que neste caso poderia representar a tensão suportável por um PTC.

A equação 1 abaixo, apresenta o cálculo do preço de um comprimento determinado de fio isolado de cobre, que é considerado como sendo proporcional ao quadrado de seu diâmetro nú acrescido de uma constante:

$$preço = P_{Cu} (d_{Cu}^2 + K_d) \quad (1)$$

onde  $d_{Cu}$  é o diâmetro do condutor. A equação acima contém parâmetros de uma curva, que pode ser levantada por um processo simples. Coloca-se na abcissa o diâmetro nú ao quadrado de cada fio, e em ordenada, o seu preço por quilograma multiplicado pelo diâmetro ao quadrado, traçando-se a reta que os interpola, determinam-se:

$P_{Cu}$ : tangente do ângulo entre a reta e o eixo da abcissa e  $K_d$  a interseção da reta com esse eixo.

O preço de um capacitor  $i$  qualquer é considerado como a soma de um preço inicial com um valor proporcional à sua capacidade, como demonstrado na equação 2, abaixo:

$$preço = P_{oi} + P_{ui} \mu F_i \quad (2)$$

Para dois capacitores:

$$P_o = P_{o1} + P_{o2} \quad : \text{Preço total} \quad (3)$$

Obtendo-se a curva para uma linha de capacitores, que tenha em abcissa a capacidade e em ordenada o preço

correspondente, traça-se uma reta que os interpola, determinado-se assim:

$P_{ui}$ : tangente do ângulo entre a reta e o eixo da abcissa;

$P_{oi}$ : interseção da reta com o eixo da ordenada e

$\mu F_i$ : capacidade do capacitor em  $\mu F$ .

### 4.0 - O PROCESSO DE CÁLCULO

Os passos devem ser fornecidos em forma de percentagem. O valor recomendado para o passo inicial se situa entre 8 e 15%. Os demais devem ser de  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{1}{3}$  do valor anterior. Por exemplo: 8, 4 e 2 ou 4, 2 e 1.

Calcula-se o novo desempenho, por intermédio das alterações efetuadas às variáveis dependentes (ou restrições) para o conjunto de projetos determinado acima. São alterados todos os dados que correspondem às variáveis independentes, multiplicando-os pelos valores das mesmas. O projeto otimizado pode então ser calculado até o fim da etapa de cálculo de enrolamentos (recalculo). Este projeto também pode servir como projeto inicial para uma nova otimização.

Finalmente através da solução final encontrada, altera-se os dados do projeto inicial, transformando-o no projeto otimizado (solução final).

### 5.0 – DADOS INICIAIS

Em qualquer motor são conhecidos os seguintes parâmetros que as definem, e são:

$F_l$ : frequência da linha [Hz];

$V_l$ : tensão nominal [V];

$W_n$ : potência nominal [W];

$P_{av}$ : perdas por atrito e ventilação [W].

#### 5.1 – Dados estritamente necessários

Os dados a seguir serão estritamente necessários para a definição do desempenho, e são:

$TAP$ : número de Tap ligado à linha;

$C_h$ : conjugado harmônicos;

$L_i$ : opção de ligação da primeira impedância externa;

$T_e$ : temperatura de cálculo dos enrolamentos do estator em  $^{\circ}C$ ;

$T_r$ : temperatura de cálculo dos enrolamentos do rotor em  $^{\circ}C$  (se 0,  $=T_e$ );

$V_d$ : relação da tensão de desempenho pela tensão nominal;

$T^{[a]}R^{[b]} = c$ : expressão da curva de carga – conjugado/rotação, onde  $a$  é o expoente do conjugado,  $b$  é o expoente da rotação e  $c$  igual a uma constante.

#### 5.2 Observações

a-) Para o estabelecimento dos pontos de desempenho (caso a ser otimizado), deve seguir-se a mesma

seqüência de dados de desempenho do cálculo inicial do motor base;

b-) Relativos ao fator de cobre ( $F_{Cu}$ ):

$F_{Cum}$ : fatores de cobre máximos desejados (um valor para cada ranhura, a partir da de maior passo do enrolamento principal);

$F_f$ : fator de folga (definido já acima);

c-) Limites para as variáveis independentes: mínimo, máximo (seguindo os critérios já estabelecidos anteriormente);

d-) Possível alteração dos limites para as restrições de desempenho;

e-) Relativo ao preço dos materiais ativos:

$P_{Fe}$ : preço de ferro [Unidade monetária/kg];

$P_{Cu}$ : preço incremental do condutor do estator [Unidade monetária/kg];

$K_d$ : diâmetro ao quadrado adicional [ $mm^2$ ];

$P_{Al}$ : preço do condutor do rotor (normalmente alumínio) [Unidade monetária/kg];

$P_o$ : preço inicial dos capacitores;

$P_{o1}$ : preço incremental do primeiro capacitor [Unidade monetária/ $\mu F$ ];

$P_{o2}$ : preço incremental do primeiro capacitor [Unidade monetária/ $\mu F$ ].

f-) Relativo aos passos:

P1: primeiro passo (%), P2: segundo passo (%) e P3: terceiro passo (%);

### 5.3 Considerações Finais

Na primeira etapa do procedimento, é imprescindível à análise dos resultados do cálculo para o primeiro passo, pois, se existe alguma anormalidade (por exemplo: deficiência=2,0), há algum limite não obedecido, e após a sua correção, faz-se o recálculo para completar a otimização.

## 6.0 RESULTADOS

Tabela 1 – Motor Monofásico 1/2 c.v. – 110/220V – II Pólos – 60Hz.

<b>Princ.</b>	<b>MM=0,6981</b>	<b>KE=0,8548</b>	<b>ET=241</b>
	EE=206,02	DZ=89,56	CC=123,8
<b>Princ.*</b>	<b>MM=0,6981</b>	<b>KE=0,8548</b>	<b>ET=228,2</b>
	EE=195,08	DZ=89,32	CC=123,5

Tabela 2 - Motor Monofásico 1/2 c.v. – 110/220V – II Pólos – 60Hz.

	<b>EB</b>				<b>DC1</b>	<b>DI1</b>
<b>Princ.</b>	71	68	58	44	0,75	0,81
<b>Aux.</b>	68	66	58	24	0,355	0,3834
<b>Princ.*</b>	<b>67</b>	<b>64</b>	<b>55</b>	<b>42</b>	<b>0,708</b>	<b>0,7668</b>
<b>Aux.*</b>	<b>75</b>	<b>72</b>	<b>64</b>	<b>26</b>	<b>0,271</b>	<b>0,3067</b>

(\* ) Otimizado

Observação: custo reduzido em 5,2%

MM: passo relativo de enrolamento; KE: fator de enrolamento; ET: número total de espiras em série; EE: número efetivos de espiras em série; DZ: diâmetro centralizado do enrolamento; CC: comprimento cabeça de bobina; EB: espiras por ranhuras; DC1: diâmetro do condutor; DI1: diâmetro isolado do condutor.

## 7.0 - CONCLUSÕES

- O método mostrou-se muito eficaz para otimizar os projetos aqui contemplados. Verificou-se ainda uma sensível diminuição do custo em cada projeto;
- O método é bastante simples e fácil de entender o seu processo de aplicação;
- O método também pode-se empregar para otimizar outros tipos de processos, onde estão envolvidas variáveis de natureza diferentes;
- O procedimento conduz a uma melhor compreensão do comportamento da máquina, bem como, a melhor utilização dos dados disponíveis, no início do projeto. Permite ainda uma melhor organização dos dados de projeto;
- Foram verificadas as otimizações das características de desempenho da máquina, isto é, uma diminuição significativa das perdas. Igualmente, pode-se observar um aumento do fator de potência. Isto possibilita um menor consumo da energia elétrica.
- O procedimento também é bastante flexível à escolha do projetista, permitindo-o, aceitar determinadas deficiências e assim conseguir um decréscimo maior no custo da máquina.

## 8.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) PACHECO, J., Otimização de Motor de Indução Polifásicos. Trab. de Tecn. 1990.
- (2) LITTLE, A. D., A Technical Economical and Policy Analysis of Electric Motor Equipment. Federal Energy Administration, Cambridge, MA, Contract No. CO-04-50127-00, 1976.
- (3) LUENBERGER, D. G., Linear and Nonlinear Programming. Addison-Wesley Publishing Company, 1984.
- (4) TAKEDA, K. Et All., Magnetic Properties in Thinned Grain Oriented SiFe Sheet. IEEE Trans. Magn., Vol. MAG 23, pp. 3233-3235, 1987.
- (5) TAGUCHI, T. Et All., New Grain Oriented Silicon Steel with High Permeability ORIENTCORE HI-B, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-10, pp. 123-125, 1974.
- (6) SHIMANAKA, H. Et ALL., Non-oriented Si Steels Useful for Energy Efficient Electrical Apparatus.

Symposium Proc. On Energy Efficient Electrical Steels. TMS of AIME, 1980, pp. 193-204.

(7) HUANG, H. Et All., Optimization of Single-Phase Induction Motor Design. Part I: Formulation of the Optimization Technique, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. EC-3, No. 2, June 1988, pp. 349-356.

(8) HUANG, H. Et All., Optimization of Single-Phase Induction Machines with Respect to Efficiency for Given Performance and Cost Constraints. Doctoral Thesis, University of Colorado, Boulder, 1987.

(9) HUANG, H. Et All., Optimization of Single-Phase Induction Motor Design. Part II: The Maximum Efficiency and Minimum Cost of an Optimal Design. IEEE Summer Power Meeting, San Francisco, July, 12-17, 1987.

(10) APPELBAUM, J. Et All., Optimization of Three-Phase Induction Motor Design. Part I: Formulation of the Optimization Technique. IEEE Summer Power Meeting, Mexico City, Mexico, July, 20-25, 1986. Paper No. 86 SM 486-5.

(11) APPELBAUM, J. Et All., Optimization of Three-Phase Induction Motor Design. Part II: The Efficiency and Cost of an Optimal Design. IEEE Summer Power Meeting, Mexico City, Mexico, July, 20-25, 1986. Paper No. 86 SM 486-5.

(12) FUCHS, E. F. Et All., Optimization of Induction Motor Efficiency, Volume. 2: Single-Phase Induction Motor Efficiency, Electric Power Research Institute, EPRI EL-4152-CCM, 1987.