

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO FATOR DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE TRACÇÃO FERROVIÁRIA

Mauro Sérgio Misculin
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal: 6.122
13.100 - Campinas - SP

João Roberto Cogo
Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Caixa Postal: 50 Telex: 031-3485
37.500 - Itajubá - MG

Artigo publicado na Revista Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico - Vol. XII - nº 1- pg. 12 a 26- 1986

RESUMO

O controle do ângulo de fase, utilizando pontes conversoras AC-DC assimétricas com controle de bloqueio, tem-se mostrado bastante vantajoso no uso de sistema de tração suprida por fonte de energia elétrica em corrente alternada. O presente trabalho procura apresentar uma metodologia visando melhorar o fator de potência neste tipo de instalação com uso de um sistema de controle que, embora provoque assimetria na forma de onda da corrente de linha, propicia um fator de potência com características capacitivas.

1 - INTRODUÇÃO

Como é de conhecimento da literatura técnica, as principais vantagens no uso de tração elétrica, com suprimento de energia elétrica em corrente alternada à frequência industrial com controle estático, são:

- 1 - Eliminação de pontes conversoras para transformação de energia elétrica AC em DC, para a linha de suprimento de energia elétrica das locomotivas.
- 2 - Facilidade em obter-se energia elétrica diretamente das concessionárias de energia elétrica em alta tensão (baixa corrente), o que é útil principalmente, no caso de linhas de trem que percorrem grandes distâncias, pois com isso tem-se a transformação da energia elétrica no ponto de uso, em tensão conveniente ao suprimento das locomotivas.
- 3 - Facilidade e simplicidade na obtenção do sistema de controle pois o acionamento é feito, diretamente, através da tensão DC obtida da AC, nos terminais do motor de tração.

Por outro lado, as desvantagens também são muito conhecidas da literatura técnica que menciona:

- 1 - O aumento da potência reativa exigida por este tipo de sistema de tração, que caracteriza-se como uma carga adicional e bastante variável para as subestações.
- 2 - A distorção da tensão provocada pelo fato da corrente ser não senoidal.
- 3 - A influência eletromagnética provocada pelo fato da corrente ser não senoidal, nos sistemas de telecomunicações e sinalização.

Face ao exposto, visando minorar algumas das desvantagens mostradas, o presente trabalho tem por

objetivo apresentar (item 4) um controle de disparo, das pontes conversoras usadas em tração AC, que permita tornar o fator de potência, neste tipo de acionamento, capacitivo. Além disso os autores gostariam que fossem feitas críticas e sugestões acerca do sistema proposto, pois até o momento, em primeira análise, o mesmo não apresentou desvantagens marcantes ao processo e, dos trabalhos já publicados e analisados, pelos autores, não foi encontrado nenhum trabalho referente ao assunto em pauta.

2 - SISTEMA DE TRACÇÃO AC E SEUS CONTROLES

A FIGURA 1, a seguir, ilustra um tipo básico de suprimento de energia em corrente alternada e seus componentes mais importantes.

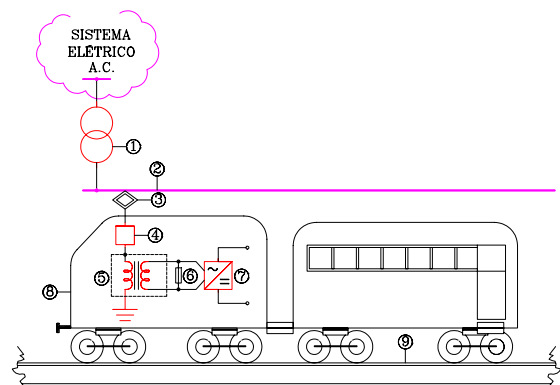


FIGURA 1 - Diagrama esquemático de um sistema de tração com suprimento de energia elétrica em corrente alternada e controle de tensão através de pontes conversoras com tiristores e diodos.

Na FIGURA 1 tem-se:

- 1 - transformador da subestação alimentado pela rede de distribuição primária (138 ou 220 [KV])
- 2 - linha de alimentação da locomotiva na faixa de 25 a 50 [KV]
- 3 - pantógrafo para a coleta de energia pela locomotiva
- 4 - chave ou disjuntor para seccionamento
- 5 - transformador da locomotiva com tensão de saída em nível compatível ao controle do motor de tração
- 6 - filtros
- 7 - ponte conversora AC/DC
- 8 - locomotiva
- 9 - trilho

O circuito básico comumente encontrado para a ponte conversora, no tipo de acionamento mostrado na FIGURA 1, está ilustrado na FIGURA 2.

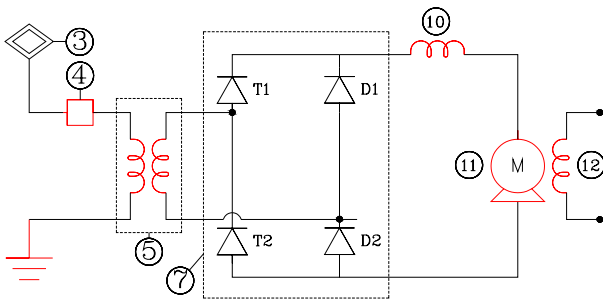


FIGURA 2 - Diagrama esquemático mostrando a ponte conversora usada em sistema de tração.

Onde na FIGURA 2 tem-se:

3, 4, 5 e 7 já mencionados na FIGURA 1.

10 - reator de alisamento

11 - motor de tração

12 - sistema de excitação

T1 e T2 - tiristores

D1 e D2 - diodos

Naturalmente a ponte conversora da FIGURA 2 não é usual na prática, para este tipo de acionamento. Na prática, é comum ter-se uma associação em série das pontes conversoras como mostra a FIGURA 3.

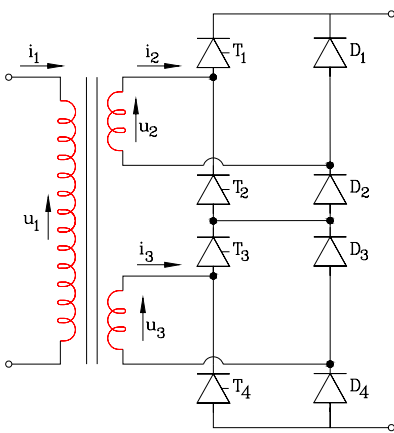


FIGURA 3 - Associação em série para pontes conversoras usadas em tração.

O tipo de ponte mostrado na FIGURA 3 possui as formas de onda de corrente em relação a tensão AC de suprimento de energia como ilustrado na FIGURA 4, onde para a obtenção das mesmas desprezou-se o efeito da comutação, e admitiu-se, que a fonte de suprimento de energia possui, uma forma de onda perfeitamente senoidal à frequência industrial.

Com a finalidade de reduzir os harmônicos gerados [5] e aumentar o fator de potência é comum encontrar-se a ponte conversora mostrada na FIGURA 5.

Onde na FIGURA 5 as identificações 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11 e 12 já foram mencionadas nas FIGURAS 1 e 2, e as novas identificações são descritas a seguir:

- 13 - sistema de chaveamento para frenagem
- 14 - sistema de chaveamento para inversão de marcha
- 15 - sistema de comutação forçada de corrente de linha
- 16 - sistema de controle de excitação

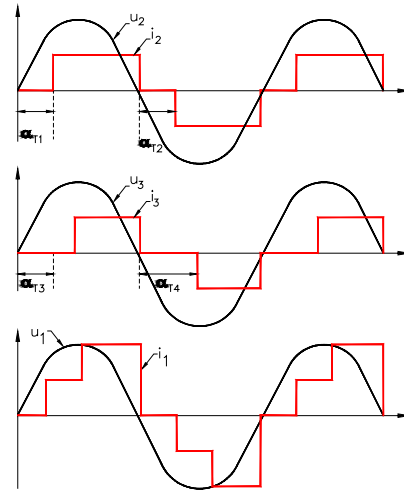


FIGURA 4 - Formas de onda de corrente e tensão para a ponte conversora da FIGURA 3 (α ângulo de disparo dos tiristores).

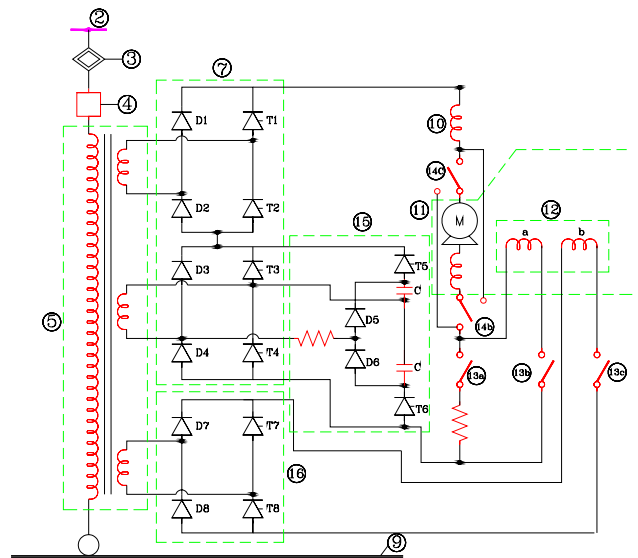


FIGURA 5 - Configuração básica do sistema de tração com controle de fase [5].

O uso da ponte conversora identificada por 15, na FIGURA 5, tem por finalidade efetuar o corte de corrente antes da tensão passar por zero, fazendo o que é denominado por controle de ângulo de fase.

Naturalmente existem outras variantes ([2], [3]) para o sistema de comutação forçada da FIGURA 5.

Com a finalidade de mostrar o controle do fator de potência atual existente em tração AC e aquele que será exposto neste trabalho, analisa-se a seguir um sistema que, simplificada, ilustra o bloco 15 de controle do ângulo de fase, mostrado na FIGURA 5.

3 - ANÁLISE DE UM SISTEMA BÁSICO PARA CONTROLE DO ÂNGULO DE FASE

Para o sistema identificado por 15, mostrado na FIGURA 5, pode-se encontrar um circuito simplificado equivalente como ilustra a FIGURA 6.

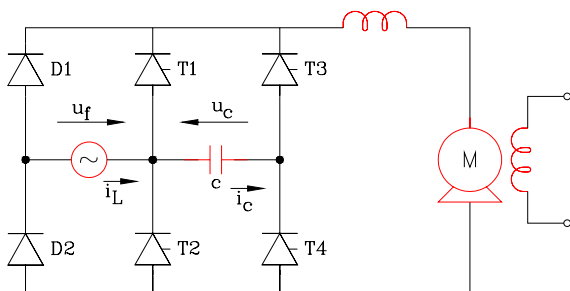


FIGURA 6 - Circuito equivalente simplificado para o sistema com controle do ângulo de fase ilustrado na FIGURA 5.

Com o circuito indicado na FIGURA 6, os tiristores podem ser ligados em qualquer instante onde a tensão u_f é positiva e, podem ser desligados sem ter que esperar a tensão u_f atingir o valor zero, simplesmente carregando-se convenientemente, o capacitor ([2], [3], [5] e [6]). Desta forma pode-se controlar a fase da componente fundamental da corrente de linha e portanto a potência reativa e o fator de potência como consequência.

A forma de onda da corrente obtida por este processo está indicada na FIGURA 7.

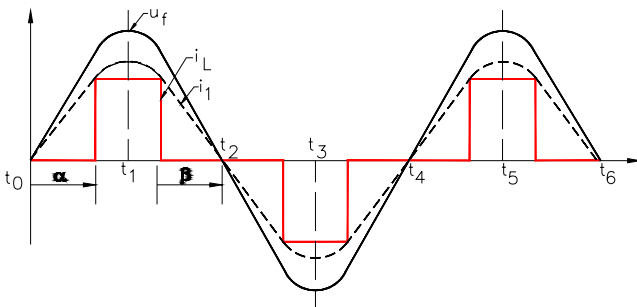


FIGURA 7 - Formas de onda de tensão e corrente para o sistema da FIGURA 6. (A FIGURA não está em escala)

Na FIGURA 7 tem-se:

u_f - forma de onda da tensão da fonte de suprimento de energia.

i_L - forma de onda da corrente de linha.

i_1 - componente fundamental da corrente i_L .

α - ângulo de disparo.

β - ângulo de deslocamento ou de bloqueio.

Note que se $\alpha = \beta$ a componente fundamental da corrente e a tensão estão em fase. Desta forma, o fator de deslocamento é unitário.

Normalmente, o tipo de controle utilizado na prática faz com que o fator de potência quando

comparado com sistema sem controle de fase tenha o desempenho mostrado na FIGURA 8.

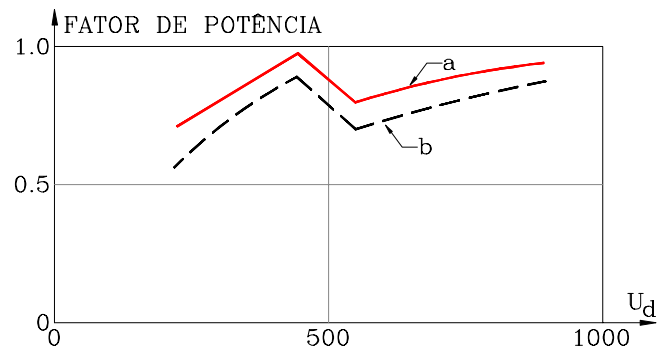


FIGURA 8 - Característica do fator de potência em função do valor médio da tensão de saída (u_d) da ponte conversora [5].

a - com controle de ângulo de fase.

b - sem controle de ângulo de fase.

4 - PROPOSIÇÃO DE ALTERAÇÃO NO SISTEMA DE DISPARO PARA OBTENÇÃO DE ÂNGULO DE DESLOCAMENTO E FATOR DE POTÊNCIA COM CARACTERÍSTICA CAPACITIVA

Nota-se que o início do processo (vide FIGURAS 6 e 7) para comutação de correntes antes da tensão passar por zero é função da polaridade de tensão do capacitor. Se a tensão u_c (vide FIGURA 6) tiver polaridade negativa pode se bloquear T_1 caso contrário T_2 .

O tempo necessário para o capacitor ser polarizado depende do instante em que os tiristores T_3 e T_4 recebem os pulsos de ignição.

Para o sistema mostrado na FIGURA 6, a polaridade e o valor de tensão u_c depende dos pulsos de disparo para o tiristor T_3 (T_4), e se estes pulsos estiverem entre os instantes t_0 e t_1 (t_2 e t_3) a tensão no capacitor u_c fica no valor máximo positivo (negativo) e o bloqueio do tiristor T_3 (T_4) ocorrerá no instante t_1 (t_3). Por outro lado, se os pulsos de disparo do tiristor T_3 (T_4), vide a FIGURA 9b, estiverem entre os instantes t_1 e t_2 (t_3 e t_4), o valor da tensão atingida por u_c será função do tempo necessário ao bloqueio da corrente, bem como do início do disparo.

A FIGURA 9, ilustra a forma de onda da tensão obtida por u_c apenas considerando o disparo do tiristor T_3 (para o T_4 é análogo, porém, a polaridade da tensão no capacitor é inversa).

Desta forma, o conjunto T_1 , C e T_3 (T_2 , C e T_4) pode ser imaginado como um tiristor de dois gatilhos, um gatilho para o início da condução e outro para o bloqueio, (vide FIGURA 10), pois quando o capacitor se carrega com polaridade positiva, devido o disparo de T_3 , pode-se bloquear o tiristor T_2 pelo disparo de T_4 . Quando o capacitor se carrega com polaridade negativa, devido o disparo de T_4 , pode-se bloquear o tiristor T_1 pelo disparo de T_3 . Todavia, devido a característica do circuito, o capacitor tem um limite

para o tempo de carga. Quando o disparo do tiristor T_3 (T_4) ocorre entre os instantes t_0 e t_1 (t_2 e t_3) o bloqueio do mesmo só ocorre no instante t_1 (t_3), vide FIGURA 9.a.

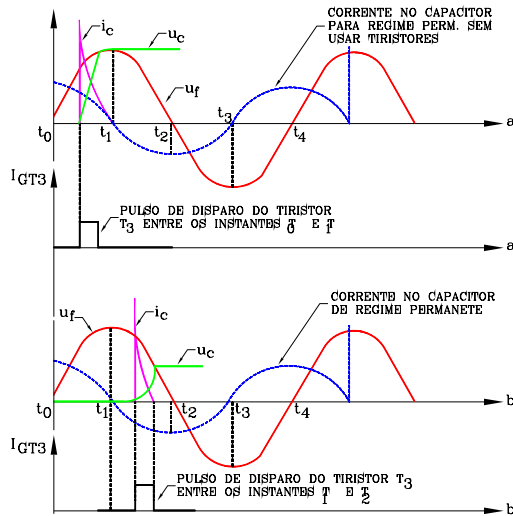


FIGURA 9 - Formas de onda de tensão e corrente
a - disparo de T_3 entre t_0 e t_1
b - disparo de T_3 entre t_1 e t_2

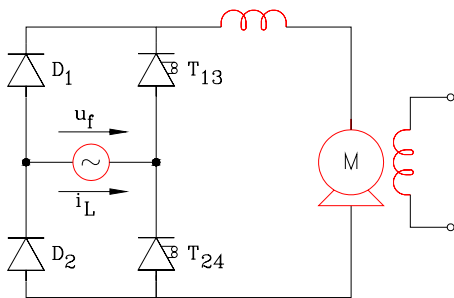


FIGURA 10 - Circuito equivalente simplificado para o sistema da FIGURA 6.

Considerando-se a seqüência de disparo ilustrada na FIGURA 11 nota-se que α é diferente de β ($\alpha < \beta$) e neste caso a componente fundamental da corrente fica com característica capacitiva, como pode-se observar pela TABELA 1.

5 - RESULTADOS

Para a forma de onda da corrente de linha i_L mostrada na FIGURA 11 pode-se verificar que:

$$\begin{aligned} i_L &= I_d && \text{para } \alpha < \omega t < (\pi - \beta) \\ i_L &= 0 && \text{para } (\pi - \beta) < \omega t < \pi \\ i_L &= -I_d && \text{para } (\pi + \alpha) < \omega t < (2\pi - \beta) \\ i_L &= 0 && \text{para } (2\pi - \beta) < \omega t < 2\pi \end{aligned}$$

A decomposição de i_L em série trigonométrica de Fourier fornece (vide TABELA 1) os resultados de amplitude e ângulo de deslocamento para os harmônicos até a 13ª ordem (considerou-se na

construção desta TABELA apenas alguns valores de α e β).

A FIGURA 12 ilustra a forma das características do fator de potência e do ângulo de deslocamento (ψ) da componente fundamental de i_L com função de α e β .

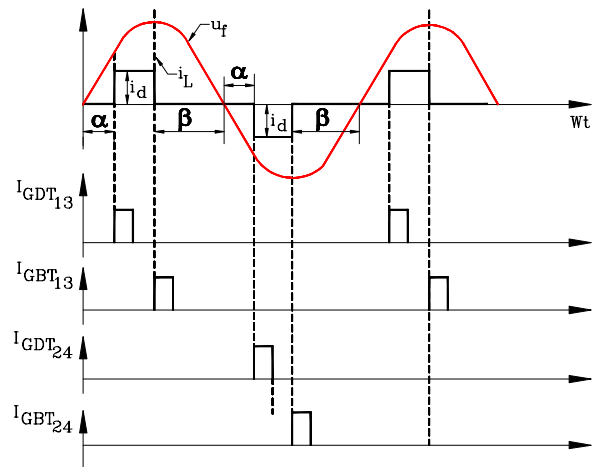


FIGURA 11 - Forma de onda i_L considerando a seqüência de pulsos para disparo (I_{GDT13} E I_{GDT24}) e de pulsos para bloqueio (I_{GBT13} e I_{GBT24}) com a finalidade de propiciar uma característica assimétrica na forma de onda da corrente i_L .

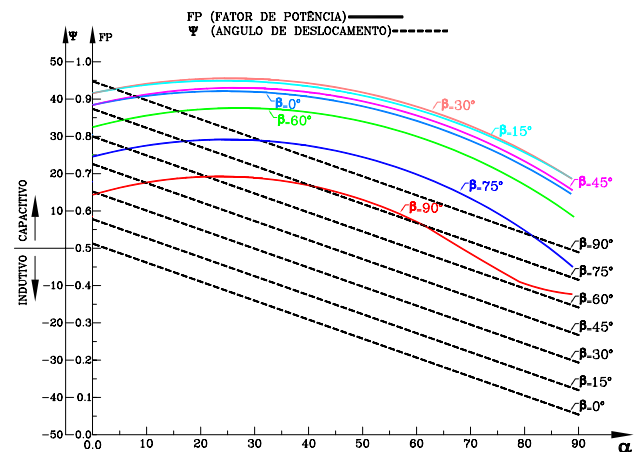


FIGURA 12 - Curvas características do fator de potência e ângulo de deslocamento em função de α e β .

6 - CONCLUSÃO

Verifica-se que um controle de disparo no início e no bloqueio dos tiristores T_1 e T_2 de modo que a corrente seja assimétrica, em relação aos instantes $\omega t = \pi/2$ e $\omega t = 3\pi/2$ respectivamente propicia, dentro de uma faixa de valores α e β , um fator de potência capacitivo, o que vem a ser interessante para a concessionária e, também no que diz respeito ao dimensionamento dos bancos que compõem os filtros.

Nota-se, entretanto, que a geração dos harmônicos de corrente para este tipo de controle é elevada em relação a obtida quando o controle é

simétrico, porém com as características capacitivas mencionadas, pode-se neste caso, reduzir a potência global dos bancos de capacitores uma vez que, com este controle, a necessidade de potência reativa média é menor.

Uma vez que existe uma relação linear entre ψ_1 (ângulo que define a característica capacitiva da corrente) e o ângulo de disparo α e o ponto de

mudança da característica de capacitiva para indutiva, para cada β , ocorre quando $\alpha = \beta$, e desta forma a implementação deste tipo de controle não é de difícil execução.

Nota-se (vide FIGURA 12) que os maiores valores do fator de potência ocorre para β entre 15° e 30° quando a característica é capacitiva.

TABELA 1										
Ângulo de disparo α	Ângulo de bloqueio β	Amplitude do harmônico de ordem n: - valor eficaz - (tomou-se como base nesta TABELA que $I_d = 3$ [pu])							Ângulo de fase da componente fundamental ψ_1	Fator de potência $FP = \frac{I_1 \cos \psi_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{13} (I_n)^2}}$
		I_1	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}		
0°	45°	2,50	0,34	0,21	0,36	0,28	0,09	0,08	22,0°	0,897
15°	45°	2,34	0,00	0,47	0,33	0,00	0,21	0,18	15,0°	0,932
30°	45°	2,14	0,34	0,54	0,05	0,28	0,15	0,13	7,0°	0,939
45°	45°	1,91	0,64	0,38	0,27	0,21	0,17	0,15	0,0°	0,914
60°	45°	1,64	0,83	0,07	0,38	0,11	0,19	0,16	-7,0°	0,856
75°	45°	1,35	0,90	0,27	0,19	0,30	0,12	0,10	-15,0°	0,771
0°	30°	2,61	0,64	0,14	0,10	0,21	0,24	0,20	15,0°	0,927
15°	30°	2,50	0,34	0,21	0,36	0,28	0,09	0,08	7,0°	0,962
30°	30°	2,34	0,00	0,47	0,33	0,00	0,21	0,18	0,0°	0,965
45°	30°	2,14	0,34	0,54	0,05	0,28	0,15	0,13	-7,0°	0,939
60°	30°	1,91	0,64	0,38	0,27	0,21	0,17	0,15	-15,0°	0,882
0°	15°	2,68	0,83	0,43	0,23	0,11	0,03	0,03	7,0°	0,932
15°	15°	2,61	0,64	0,14	0,10	0,21	0,24	0,20	0,0°	0,960
30°	15°	2,50	0,34	0,21	0,36	0,28	0,09	0,08	-7,0°	0,962
45°	15°	2,34	0,00	0,47	0,33	0,00	0,21	0,18	-15,0°	0,932
60°	15°	2,14	0,34	0,54	0,05	0,28	0,15	0,13	-22,0°	0,875
0°	0°	2,70	0,90	0,54	0,39	0,30	0,25	0,21	0,0°	0,914
15°	0°	2,68	0,83	0,43	0,23	0,11	0,03	0,03	-7,0°	0,932

TABELA 1 - Alguns valores característicos dos componentes harmônicos (I_n) e ângulo de fase da componente fundamental da corrente (ψ_1) e fator de potência (FP) em função do ângulo de disparo (α) e de bloqueio (β). Notar que ψ_1 sendo positivo indica que a componente fundamental da corrente está adiantada da tensão e, portanto com característica capacitiva, caso contrário, indutiva.

7 - REFERÊNCIAS

- [1] - Jäger, A.; Baechler, V.; Brom, B. Measures for improving the grid response of thyristor-controlled traction vehicles. *Brow Boveri Review* nº12, Vol.60, 1973 pag. 501 a 525;
- [2] - Müller, A. Multi-Step and self-commutated single-phase bridge converter. *IFAC symposium 1977*, pag. 733 a 743;
- [3] - Windmüller, R. Calculation of the electrical quantities of converter circuits shown in this case for a quenching, asymmetrical bridge circuit (Lub) *IFAC symposium 1977*, pag. 19 a 25;
- [4] - Souza, Carlos R.; Miskulin, Mauro S. Simulador analógico para avaliação do comportamento transitório da linha de alimentação de um sistema monofásico de tração elétrica controlada por tiristores IV Congresso Brasileiro de Automática, 1984, Campina Grande - Paraíba;
- [5] - Brechbuhler, M.; Strabo, B. The static converter as modern power controller. *Brow Boveri Review*, nº12, Vol. 69, 1982 pag. 441 a 452;
- [6] - Cogo, J. R.; Miskulin, Mauro S. Sistemas de tração AC - Curso de doutoramento - IA 348, janeiro/fevereiro 1985 - UNICAMP.

8 - CURRICULUM VITAE

Mauro Sérgio Miskulin, Engenheiro eletricitista pela Universidade de Campinas em 1970; curso de doutorado pela Universidade de Manchester.

João Roberto Cogo, Engenheiro eletricitista pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá em 1974; mestre em ciências pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1977.