

UM CONTROLADOR APLICADO AO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL - VFT

Antonio F. C. Aquino¹

Arjan C. Vinhaes¹

Edson H. Watanabe²

Maurício Aredes²

¹ Operador Nacional do Sistema Elétrico
Rua da Quitanda, 196, Rio de Janeiro/RJ, Brasil
aquino@ons.org.br

arjancv@ons.org.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro
C.P. 68504, Rio de Janeiro/RJ, Brasil
watanabe@coe.ufrj.br

aredes@ufrj.br

Resumo – Este artigo apresenta uma proposta de controlador para o Transformador de Frequência Variável, ou VFT (*Variable Frequency Transformer*), aplicado na interligação de sistemas elétricos de mesma frequência nominal, mas sem a necessidade de estarem conectados de forma síncrona por meio de uma interligação CA. Foram desenvolvidos modelos lineares do VFT e dos sistemas de potência, através dos quais o controlador proposto para o VFT foi ajustado. A adequação das proposições foi comprovada através de simulações digitais utilizando modelo detalhado do VFT e da rede elétrica.

Palavras-Chave – VFT, Transformador de Frequência Variável, Interligação de Sistemas Elétricos, MIDA.

A CONTROLLER APPLIED TO VARIABLE FREQUENCY TRANSFORMER - VFT

Abstract – This paper presents a controller for the Variable Frequency Transformer – VFT suitable for interconnecting two power grids with the same power frequency, but without the necessity of being synchronously interconnected by an AC interconnection. Transfer functions of the linearized models of the VFT and the power system were developed and were used for tuning the proposed VFT controller. The adequacy of the proposals was confirmed by digital simulations using detailed models of the VFT and the power grid.

Keywords – VFT, Variable Frequency Transformer, Interconnected Power Systems, DFIG.

I. INTRODUÇÃO

As interligações entre sistemas elétricos permitem aproveitar a diversidade existente entre os mesmos, no que se refere aos custos de produção da energia elétrica em cada sistema, a aspectos ambientais específicos, à sazonalidade das cargas e das fontes primárias de energia. Além disso, a conexão de um ou mais sistemas elétricos conduz ao aumento da segurança elétrica desses sistemas.

As tecnologias atualmente disponíveis permitem constituir interligações em corrente alternada ou em corrente contínua.

Artigo submetido em 05/12/2011. Primeira revisão em 11/02/2012, segunda revisão em 15/04/2012. Aceito para publicação em 01/05/2012 por recomendação do editor João Onofre P. Pinto.

No caso particular do Transformador de Frequência Variável, ou VFT (do inglês *Variable Frequency Transformer*), a interligação entre os sistemas é realizada por uma máquina rotativa [1]-[5].

O VFT comporta-se como um transformador defasador rotativo, em cujos terminais são conectados os sistemas que se deseja interligar. O ajuste da potência ativa entre esses sistemas (intercâmbio) depende da aplicação e controle do torque no eixo do VFT [6][7]. Neste sentido, o controle do VFT é fundamental para que o desempenho dos sistemas elétricos interligados seja adequado [8].

Este artigo apresenta uma proposta de controlador para o VFT quando aplicado na conexão de sistemas elétricos de mesma frequência nominal, mas sem a necessidade de estarem conectados de forma síncrona por uma interligação em corrente alternada. A proposta baseou-se em resultados obtidos através de modelos lineares do VFT e da rede elétrica, apresentados na seção III. Das análises realizadas na seção IV, foram propostos a estrutura do controlador e os ajustes correspondentes. Na seção V apresentam-se simulações digitais que comprovam a adequação da estrutura e dos ajustes do controle proposto.

II. O TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

O VFT é um dispositivo que permite transferir energia entre dois pontos do(s) sistema(s) elétrico(s), podendo estabelecer fluxo de potência ativa em ambos os sentidos, de forma controlada. O primeiro VFT foi instalado e comissionado pela Hydro-Quebec, na subestação de Langlois, no ano de 2004 [4]. O equipamento foi dimensionado para transferir 100 MW entre o sistema elétrico de Quebec, no Canadá, e a rede de Nova York, EUA.

O principal componente do VFT é uma máquina elétrica com enrolamentos trifásicos no estator e no rotor. Em seus terminais conectam-se, através de transformadores, os sistemas que se pretende interligar. Mecanicamente acoplada ao eixo do VFT, uma máquina de corrente contínua permite ajustar a posição relativa dos campos do rotor e do estator, agregando controle contínuo do fluxo de energia entre os sistemas interligados [6][7]. A Figura 1 apresenta o diagrama esquemático do VFT com seus principais elementos.

A. Aplicações do VFT

O VFT permite interligar sistemas síncronos ou assíncronos. Na interligação entre sistemas assíncronos, não há associação direta entre as frequências f_1 e f_2 referentes aos sistemas 1 e 2, não obstante a frequência nominal possa ser igual. Na interligação entre sistemas síncronos, a frequência dos dois sistemas é igual em regime permanente.

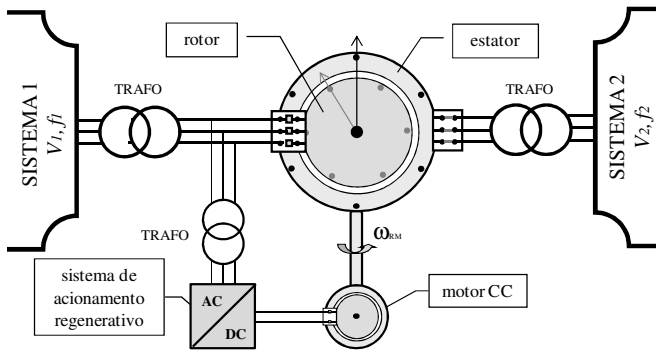


Fig. 1. Diagrama esquemático do VFT.

Quando são conectados dois sistemas assíncronos aos terminais do VFT, o rotor da máquina tende a girar na velocidade correspondente à frequência de escorregamento desses sistemas. O sistema de controle deve garantir que essa velocidade seja respeitada e que a posição do rotor seja tal que viabilize a transferência de potência desejada. A teoria básica de funcionamento do VFT está apresentada a seguir.

B. Funcionamento básico do VFT

O VFT é uma máquina com enrolamentos trifásicos no rotor e estator, conforme ilustrado na Figura 2. Nesta figura estão representados seis terminais (A, B, C e a, b, c) que derivam dos enrolamentos trifásicos do estator e do rotor, respectivamente; os terminais do rotor encontram-se conectados aos seus enrolamentos por escovas, uma vez que o rotor pode mover-se em relação ao estator.

Para obter controle do fluxo de energia através do VFT faz-se necessária a aplicação e controle do torque no eixo da máquina, de forma a ajustar a posição relativa dos campos do rotor e do estator. Ou seja, o estabelecimento do fluxo de potência pelo VFT está relacionado à defasagem angular imposta, externamente, entre os campos do rotor e estator.

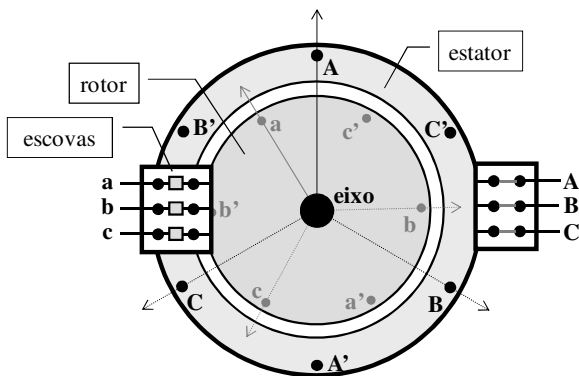


Fig. 2. Máquina com enrolamentos trifásicos no rotor e estator.

C. Relação velocidade do rotor x desvio de frequência

A frequência de escorregamento entre dois sistemas síncronos é zero em regime permanente. Em uma conexão assíncrona sempre haverá algum desvio de frequência, mesmo no caso da conexão de sistemas de mesma frequência nominal (60/60 Hz sem interligação CA, por exemplo).

As equações a seguir relacionam, em regime permanente, a velocidade do rotor do VFT e o escorregamento de frequência verificado entre os sistemas [7]:

$$f_{RM} = f_S - f_R \quad (1)$$

$$n = f_{RM} \left(\frac{120}{N_P} \right) \quad (2)$$

onde f_{RM} é a velocidade de rotação do rotor, em Hz, f_S e f_R são, respectivamente, as frequências das tensões do estator e rotor, em Hz, N_P é o número de pólos da máquina e n é a velocidade de rotação do rotor, em rpm.

A equação (2) indica que a velocidade do rotor do VFT é proporcional ao escorregamento de frequência verificado entre os dois sistemas. Assim, em regime permanente, a velocidade do rotor será zero em uma conexão síncrona. Em uma conexão assíncrona, a velocidade de rotação do rotor será, em geral, diferente de zero, embora possa apresentar valores muito baixos em função do desempenho do controle carga-frequência dos sistemas interligados.

D. Relação potência x ângulo

O controle da defasagem angular entre os campos do estator e do rotor do VFT é o que permite ajustar o fluxo de potência ativa na interligação. O fluxo pelo VFT pode ser aproximado pelas expressões a seguir [6]:

$$P_{VFT} = \left(\frac{V_S V_R}{X_{SR}} \right) \sin(\theta_S - (\theta_R + \theta_{RM})) \quad (3)$$

$$\theta_{VFT} = \theta_S - (\theta_R + \theta_{RM}) \quad (4)$$

onde P_{VFT} é a potência ativa entrada no estator do VFT, V_S e V_R são os módulos das tensões no estator e rotor, respectivamente, X_{SR} é a reatância total entre os sistemas elétricos, θ_S e θ_R são, respectivamente, os ângulos de fase de V_S e V_R em relação à referência, θ_{RM} é o ângulo de fase do rotor em relação ao estator e θ_{VFT} é a defasagem angular efetiva imposta pelo VFT.

Os ângulos de fase referentes às equações (3) e (4) estão indicados na Figura 3, que apresenta o diagrama vetorial das tensões aplicadas ao VFT. A máxima transferência de potência teórica é verificada para defasagem θ_{VFT} de 90° . Na prática, para uma operação estável em regime permanente e transitório, deve-se operar com ângulo bem menor que 90° .

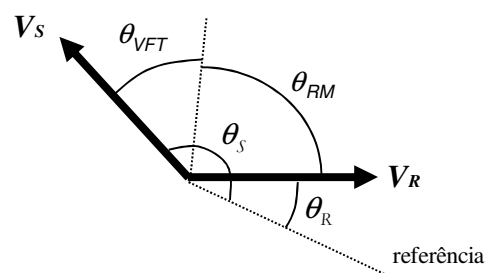


Fig. 3. Diagrama vetorial do VFT [7].

A operação com ângulo θ_{VFT} diferente de zero, e com potência ativa diferente de zero na interligação, depende da aplicação de torque externo no eixo do VFT, como será apresentado na próxima seção. Sem aplicação desse torque, o ângulo θ_{VFT} e, por consequência, o fluxo na interligação tendem para zero, qualquer que seja o desvio de frequência entre os sistemas e a correspondente velocidade de rotação do rotor. Este comportamento está associado a um movimento natural do rotor que se movimentará para que os campos do estator e do rotor se alinhem, mesmo que os ângulos das tensões de estator e rotor estejam defasados.

E. Controle do fluxo na interligação

A Figura 4 apresenta um diagrama representativo do VFT, com seus principais elementos. Nesta figura, as grandezas P_S , P_R e P_D representam, respectivamente, as potências elétricas no estator e no rotor e a potência mecânica transferida ao eixo do VFT pelo sistema de aplicação de torque.

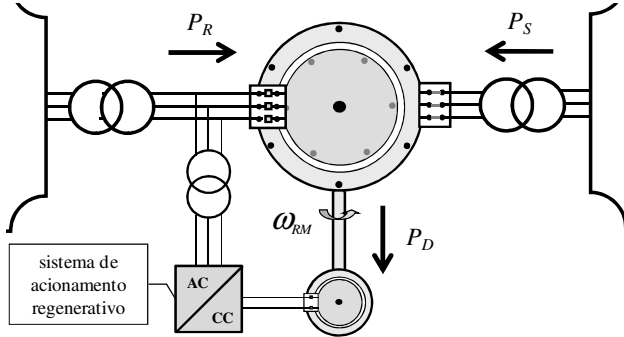


Fig. 4. Balanço de energia no VFT.

As equações que determinam o balanço de energia no VFT, apresentadas em [7], estão descritas a seguir:

$$P_S = P_D - P_R \quad (5)$$

$$P_D = P_S \left(1 - \frac{f_R}{f_S}\right) \quad (6)$$

$$T_D = N_S I_S \Psi_A \quad (7)$$

onde T_D é o torque aplicado pelo sistema de acionamento, I_S é a corrente no estator do VFT, N_S é o número de espiras do enrolamento do estator e Ψ_A é o fluxo no entreferro.

Observa-se em (7) que o torque T_D é independente da velocidade de rotação do rotor do VFT, sendo proporcional à corrente do estator e ao fluxo no entreferro. Como o VFT opera com fluxo aproximadamente constante, pode-se dizer que o torque T_D depende apenas da corrente de estator. Desta forma, o torque T_D aplicado no eixo do VFT é proporcional ao fluxo de potência que atravessa o entreferro da máquina, ou seja, que flui pela interligação [7]. Nesse sentido, a forma mais natural para o controle do fluxo de potência no VFT é através do controle do torque aplicado ao seu eixo.

Nos VFT atualmente instalados, a aplicação do torque é realizada por uma máquina de corrente contínua, acoplada de forma solidária ao eixo do VFT. O sistema de acionamento (retificador com pontes em antiparalelo) tem capacidade de regeneração de energia e está apto a aplicar torque em ambas as direções, mesmo com o rotor parado.

Como requisito básico, o controlador do VFT deve atuar – continuamente – para eliminar o erro de potência na interligação, ou seja, a diferença verificada entre a potência desejada e a potência medida. Este requisito de controle será considerado na proposta apresentada na seção IV.

III. MODELO LINEAR DO VFT E DA REDE ELÉTRICA

Esta seção apresenta modelos simplificados para o VFT (incluindo seu sistema de controle) e para os sistemas elétricos a serem interligados. O objetivo é dispor de um modelo mais simples que permita a análise expedita do desempenho dinâmico do VFT quando submetido a diferentes condições operativas, tendo em vista a definição de um controlador para o equipamento.

A. Características gerais do modelo

A Figura 5 apresenta a rede elétrica considerada, representada por dois sistemas equivalentes (reatâncias de curto-circuito X_{EQ1} e X_{EQ2}), pelas reatâncias de dispersão dos transformadores 100 MVA de conexão do VFT (X_{TR1} e X_{TR2}) e pelas reatâncias de dispersão e magnetização da máquina rotativa do VFT (X_{VFT} e $X_{MAG-VFT}$), também de potência nominal 100 MVA. A figura destaca a potência ativa (P_{VFT}) que flui pela interligação (VFT).

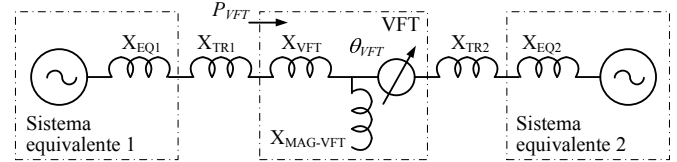


Fig. 5. Modelo da rede elétrica e do VFT.

A Figura 6 apresenta um controlador genérico $H(s)$, que atua para o erro de potência na interligação ($P_{REF} - P_{VFT}$). A saída do controlador é o torque T_D a ser aplicado no eixo do VFT através do sistema de acionamento. Sob o ponto de vista da dinâmica do sistema mecânico, o conjunto formado pelo rotor do VFT e pela máquina CC estão representados pelas constantes de inércia H e de amortecimento D . O modelo tem como saída o ângulo θ_{VFT} , que representa a defasagem angular entre os campos do estator e do rotor.

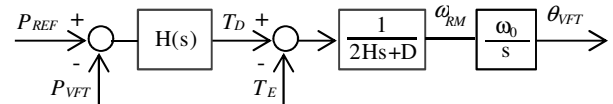


Fig. 6. Sistema de controle e representação da dinâmica do rotor.

No desenvolvimento dos modelos simplificados (lineares) para o sistema, as seguintes premissas foram adotadas: (i) os sistemas foram representados por equivalentes de curto-circuito, considerando ainda a aproximação $\sin\theta \cong \theta$, válida para defasagens angulares reduzidas; (ii) tensões nominais na rede; (iii) torque eletromagnético T_E (em pu) igual à potência P_{VFT} que flui pelo VFT (em pu), para operação do VFT com fluxo de entreferro Ψ_A constante; (iv) desprezadas as perdas elétricas na rede e no VFT. Não obstante as aproximações realizadas, o modelo permite capturar o comportamento dinâmico básico do VFT, conforme será demonstrado nas simulações com modelo detalhado na seção IV.

B. Parâmetros do sistema analisado

A Tabela I apresenta os parâmetros do sistema simulado, incluindo a rede elétrica e o próprio VFT.

TABELA I

Parâmetros do sistema (valores em %, na base 100 MVA)

| Parâmetro | Valor |
|---------------------------|----------------------|
| NCC trifásico Sis. 1 e 2 | 2.500 MVA |
| Frequência Sis. 1 e 2 | 60 Hz |
| Tensão nominal Sis. 1 e 2 | 230 kV (entre fases) |
| X_{EQ1} | 4% |
| X_{TR1} | 10% |
| X_{EQ2} | 4% |
| X_{TR2} | 10% |
| Tensão nominal do VFT | 17 kV (entre fases) |
| X_{VFT} | 12% |
| H | 26 pu-s |
| ω_0 | $2\pi 60$ rad/s |
| D | 1 pu/pu |

Os parâmetros do VFT referem-se ao equipamento instalado em Langlois e foram obtidos em [4], com exceção da constante de amortecimento D , para a qual foi utilizado valor típico.

C. Modelo da rede elétrica e do VFT em malha aberta

A Figura 7 apresenta o diagrama de blocos que representa o VFT e os sistemas equivalentes, considerando o sistema em malha aberta, ou seja, sem controle do torque aplicado T_D . Nesta figura, X_t representa a reatância total do sistema e inclui as reatâncias X_{EQ1} , X_{EQ2} , X_{TR1} , X_{TR2} e X_{VFT} .

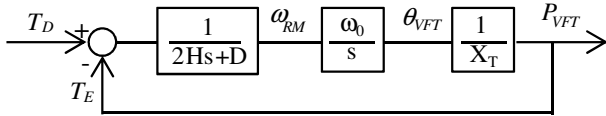


Fig. 7. Diagrama de blocos para sistema em malha aberta.

A função de transferência $P_{VFT}(s)/T_D(s)$ – do VFT e da rede elétrica – para operação em malha aberta é dada por:

$$\frac{P_{VFT}(s)}{T_D(s)} = \frac{\omega_0}{2HXts^2 + DXts + \omega_0} \quad (8)$$

Para o sistema simulado, com o VFT em malha aberta, são obtidos dois polos complexos: $-0,0096 \pm 4,2573i$. Observa-se que os polos têm parte real muito pequena, indicando que o amortecimento do sistema é quase nulo nesta condição. Para este caso, o amortecimento das oscilações do rotor do VFT depende (exclusivamente) das características mecânicas do VFT, não havendo influência direta de outros controles.

Há que se considerar, ainda, que o VFT apresenta – naturalmente – torques em fase com os desvios angulares (torques de sincronismo), mesmo sem qualquer ação de controle. Esta característica, similar àquela observada em máquinas síncronas sem controle da excitação, está associada à tendência de alinhamento dos campos do rotor e estator.

Como conclusão, verifica-se que a operação do VFT em malha aberta não se mostra adequada. A aplicação de torque T_D no eixo do VFT, nestas condições, resultaria em oscilações do rotor e de potência ativa no VFT sem o amortecimento necessário. Desta forma, o controlador do VFT deve prover amortecimento suplementar das oscilações.

D. Modelo da rede elétrica e do VFT, com controlador PI

A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos que representa o VFT e os sistemas equivalentes, considerando o sistema em malha fechada, com controle tipo proporcional-integral de ganhos k_p e k_i .

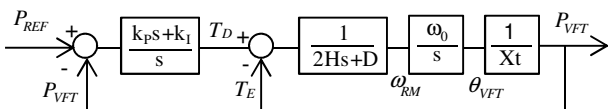


Fig. 8. Diagrama de blocos para sistema com controle PI.

A função de transferência $P_{VFT}(s)/P_{REF}(s)$ para o sistema em malha fechada com controlador tipo PI é dada por:

$$\frac{P_{VFT}(s)}{P_{REF}(s)} = \frac{\omega_0(k_p s + k_i)}{2HXts^3 + DXts^2 + \omega_0(1 + k_p)s + \omega_0 k_i} \quad (9)$$

O desempenho dinâmico do sistema descrito em (9) foi analisado para diferentes combinações de ganhos. Em nenhum dos casos foi possível obter desempenho satisfatório,

no que se refere ao amortecimento das oscilações do rotor do VFT. Esse resultado está ilustrado na Figura 9 e na Figura 10, que apresentam os polos do sistema para diferentes valores de ganhos k_p e k_i .

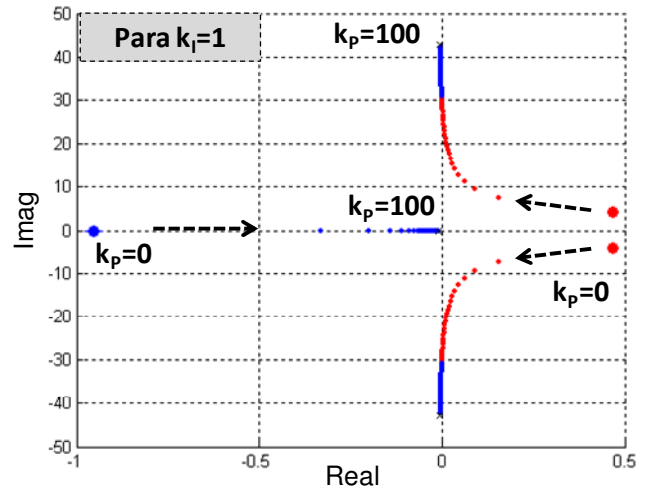


Fig. 9. Raízes do sistema, controle PI, $k_i=1$ e $k_p=0..100$.

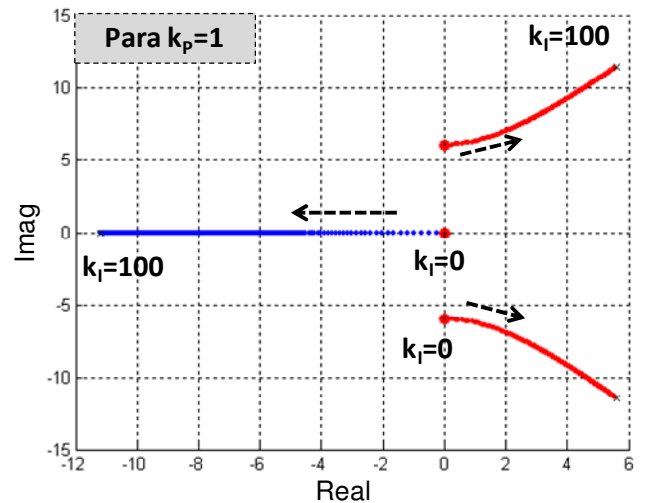


Fig. 10. Raízes do sistema, controle PI, $k_p=1$ e $k_i=0..100$.

Observa-se na Figura 9 e na Figura 10 que, em geral, os polos estão no semiplano lateral direito, indicando que o sistema é instável. Por outro lado, para os valores de ganho que estabilizam o sistema, verifica-se que a parte real dos polos é muito reduzida, indicando que o amortecimento do sistema é insuficiente na prática.

Como conclusão, verifica-se que a operação do VFT em malha fechada com controlador PI não é adequada, em face da insuficiência de amortecimento no sistema. A analogia do VFT com uma máquina síncrona indica que deve ser introduzido sinal estabilizador que produza uma referência de torque adicional em fase com os desvios da velocidade do rotor, conforme será apresentado a seguir.

E. Modelo da rede elétrica e do VFT, com controlador PI e sinal estabilizador

A Figura 11 apresenta o diagrama de blocos que representa o VFT e os sistemas equivalentes, considerando o sistema em malha fechada, com controle tipo PI e

estabilizador de ganho k_{PSS} e filtro *washout* de constante de tempo T_w . O estabilizador utiliza a velocidade do VFT como sinal de entrada; o sinal de saída é utilizado para composição da referência de torque T_D a ser aplicado no eixo do VFT.

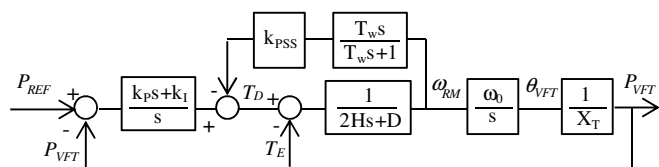


Fig. 11. Diagrama de blocos para sistema com controle PI e com sinal estabilizador.

A função de transferência $P_{VFT}(s)/P_{REF}(s)$ para sistema em malha fechada com controlador PI e estabilizador é dada por:

$$\frac{P_{VFT}(s)}{P_{REF}(s)} = \frac{\omega_0(T_w k_P s^2 + (k_P + T_w k_I)s + k_I)}{c_1 s^4 + c_2 s^3 + c_3 s^2 + c_4 s + c_5} \quad (10)$$

onde,

$$c_1 = 2HXtT_w; \quad c_2 = (2H + T_w(D + k_{PSS}))Xt; \\ c_3 = DXt + \omega_0 T_w(k_P + 1); \quad c_4 = \omega_0(k_P + 1 + T_w k_I); \\ c_5 = \omega_0 k_I.$$

A Tabela II apresenta os polos do sistema, considerando diferentes valores dos ganhos k_{PSS} , k_I e k_P . Observa-se (pela parte real dos polos) que o sinal estabilizador agrega amortecimento ao sistema.

TABELA II

Polos do sistema considerando controle PI e estabilizador

| Ganhos | Desempenho | Polos | |
|--|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | | Real | Imaginário |
| $k_P=16$ $k_I=0$ $k_{PSS}=300$ | Estável Erro de RP | 0 -2,8932 -0,3354 | 0 $\pm 17,2573$ 0 |
| $k_P=16$ $k_I=100$ $k_{PSS}=300$ | Instável | 0,0597 -5,9079 -0,3332 | $\pm 17,5185$ 0 0 |
| $k_P=16$ $k_I=100$ $k_{PSS}=1000$ | Estável Sem erro de RP | -5,3053 -8,6398 -0,3329 | $\pm 13,4869$ 0 0 |
| $k_P=16$ $k_I=10$ $k_{PSS}=300$ | Estável Sem erro de RP | -2,5942 -0,6028 -0,3307 | $\pm 17,2149$ 0 0 |
| $k_P=16$ $k_I=10$ $k_{PSS}=1000$ | Estável Sem erro de RP | -9,3087 -0,6408 -0,3252 | $\pm 14,2576$ 0 0 |
| $k_P=8,5$ $k_I=5,5$ $k_{PSS}=1000$ | Estável Sem erro de RP | -9,2929 -0,6782 -0,3193 | $\pm 8,1900$ 0 0 |

A Figura 12 e Figura 13 apresentam o desempenho dinâmico do VFT – potências $P_{REF}(t)$ e $P_{VFT}(t)$, frente a um degrau na referência de potência no instante 0,2s, para duas condições distintas: (i) caso instável, com ganhos $k_P=16$, $k_I=100$ e $k_{PSS}=300$; (ii) caso estável, com ganhos $k_P=8,5$, $k_I=5,5$ e $k_{PSS}=1000$. As simulações foram realizadas utilizando a ferramenta Simulink do Matlab.

Observa-se que o sinal estabilizador agrega amortecimento às oscilações do rotor do VFT, pois gera uma referência de torque adicional em fase com os desvios de velocidade. Esta componente adicional soma-se à

componente de torque que está em fase com os desvios angulares do rotor, responsável pelo sincronismo do VFT.

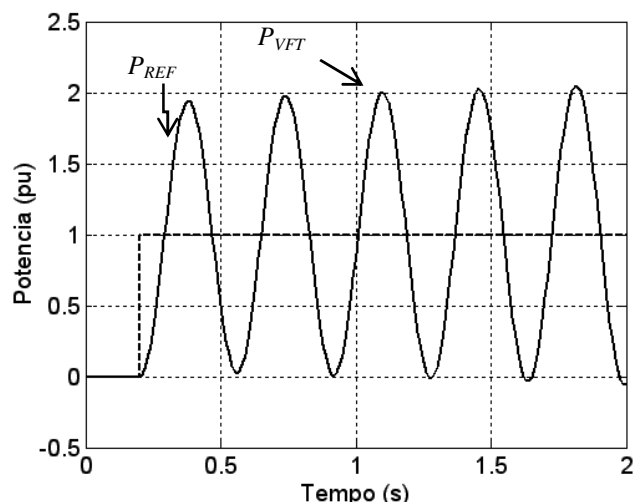


Fig. 12. $P_{REF}(t)$ e $P_{VFT}(t)$ [$k_P=16$; $k_I=100$; $k_{PSS}=300$].

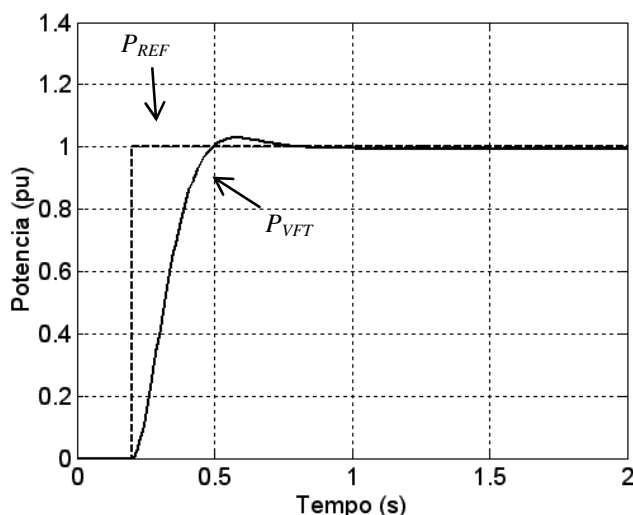


Fig. 13. $P_{REF}(t)$ e $P_{VFT}(t)$ [$k_P=8,5$; $k_I=5,5$; $k_{PSS}=1000$].

IV. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta a análise do desempenho do VFT, tendo como foco seu sistema de controle, utilizando modelos de simulação detalhados. As simulações permitem verificar a validade dos modelos lineares desenvolvidos e a adequação da estrutura e ajustes de controle propostos na seção anterior. As simulações foram realizadas no PSCAD/EMTDC™, com representação do VFT e seus controles, bem como do sistema de acionamento e dos sistemas equivalentes.

A. Modelo de simulação digital desenvolvido

A Figura 14 apresenta os principais elementos do modelo desenvolvido no PSCAD/EMTDC. Os sistemas equivalentes (Sis_1 e Sis_2, na figura) foram representados por fontes trifásicas ajustáveis, de tensão nominal 230 kV, conectada a um transformador trifásico 133 MVA – 230/17 kV, Y-Y aterrado. O nível de curto-circuito trifásico nas fontes foi ajustado em 2.500 MVA. Para a reatância de dispersão do transformador considerou-se 10% na base do equipamento.

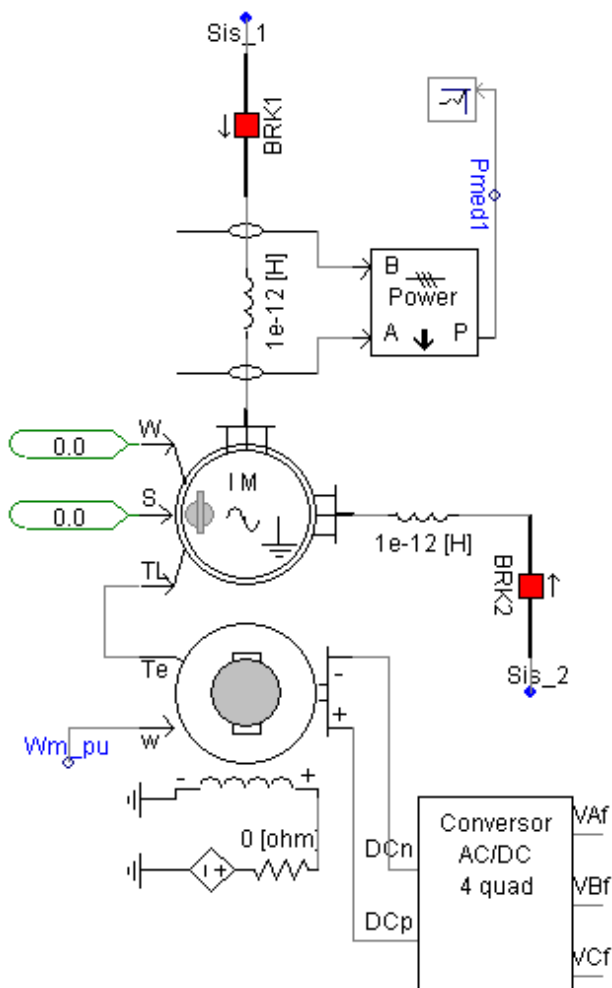


Fig. 14. Elementos principais do sistema simulado.

Para o transformador rotativo do VFT foi utilizado o modelo [Wound Rotor Induction Machine], na modalidade de controle de torque. Os parâmetros do VFT, indicados na Tabela III, referem-se ao equipamento de Langlois [4].

TABELA III

Parâmetros do VFT (valores em %, na base 100 MVA)

| Parâmetro | Valor |
|-------------------------------------|---------|
| Potência nominal | 100 MVA |
| Número de polos da máquina rotativa | 4 |
| Tensão nominal do estator | 17 kV |
| Tensão nominal do rotor | 17,5 kV |
| Reatância de dispersão do VFT | 12% |
| Reatância de magnetização do VFT | 5,6 pu |
| Reatância de dispersão dos TR | 10% |
| Constante de inércia do VFT | 26 pu-s |

Da mesma forma, para a máquina CC foram considerados os dados da máquina utilizada no VFT de Langlois: 20 polos, 2.796 kW, 48/93 rpm, 750 V, 4015 A, com o campo excitado de forma independente [6]. Como a máquina de corrente contínua é acoplada mecanicamente ao eixo do VFT, o torque eletromagnético (Te) por ela produzido é dado de entrada para a máquina de indução de rotor bobinado (TL), conforme mostrado na figura. Por outro lado, a velocidade calculada pelo modelo de máquina de indução de rotor

bobinado (Wm_pu) é fornecida como sinal de entrada para a máquina CC.

O sistema de acionamento modelado está baseado em duas pontes trifásicas a tiristores, conectadas na configuração dual (regenerativa), da mesma forma que vêm sendo empregadas nas instalações de VFT existentes [6]. De forma a obter controle do torque e do fluxo de potência ativa na interligação, foi adotada estratégia de controle de corrente na máquina CC.

B. Sistema de sincronização automático do VFT

Para conferir maior flexibilidade às simulações e reproduzir condições reais de energização e sincronismo do VFT, a conexão dos enrolamentos de rotor e estator aos sistemas 1 e 2 é realizada por meio de disjuntores tripolares (BRK1 e BRK2, na Figura 14). Os instantes de fechamento são calculados para reduzir os transitórios na manobra de fechamento. O disjuntor BRK2 recebe comando de fechamento independente de verificação, apenas energizando o VFT pelos terminais do estator. Após o fechamento do disjuntor BRK2, inicia-se a fase de sincronização do VFT, adotando-se o seguinte procedimento automático:

Fase 1 – Calcula-se o desvio de frequência entre os sistemas para determinação da velocidade necessária. Aplica-se torque no eixo do VFT até que a velocidade seja atingida, sincronizando os campos do rotor e do estator;

Fase 2 – Com os campos do rotor e estator sincronizados realiza-se a medição da defasagem angular nos terminais do disjuntor BRK1;

Fase 3 – Compara-se a defasagem angular com o ajuste angular pré-definido e efetua-se o fechamento do disjuntor BRK1 quando a defasagem angular for inferior ao ajuste.

C. Sistema de controle

Considerando os resultados obtidos na seção III, o sistema de controle do VFT está baseado em um controlador PI que atua para eliminar os erros de potência na interligação, associado a estabilizador que gera uma referência de torque em fase com os desvios de velocidade do VFT.

As análises foram feitas para os seguintes ajustes de controle: ganho proporcional $k_p=8,5$; ganho integral $k_i=5,5$; ganho proporcional do estabilizador $k_{PSS}=1000$; constante de tempo do filtro *washout* $T_w=3s$. Resultados para estes ajustes foram apresentados na seção III, para o modelo simplificado.

D. Resultados: degrau na referência de potência do VFT

A Figura 15 a Figura 20 apresentam resultados de simulações com o modelo detalhado, considerando ganhos que resultaram em operação estável na análise simplificada ($k_p=8,5$; $k_i=5,5$; $k_{PSS}=1000$). O sistema foi submetido a três degraus na referência de potência do VFT: (i) em $t=1,0s$, de +1pu; (ii) em $t=3,0s$, de -2pu; e (iii) em $t=6,0s$, de +1pu.

A Figura 15 apresenta a potência ativa na interligação e a potência de referência. Observa-se que o comportamento do sistema é amortecido, com ligeira ultrapassagem, pouco superior àquela verificada na análise linear simplificada.

Na Figura 16 apresenta-se o perfil de tensão (valor eficaz) nos sistemas 1 e 2. A Figura 17 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT para controle do fluxo na interligação.

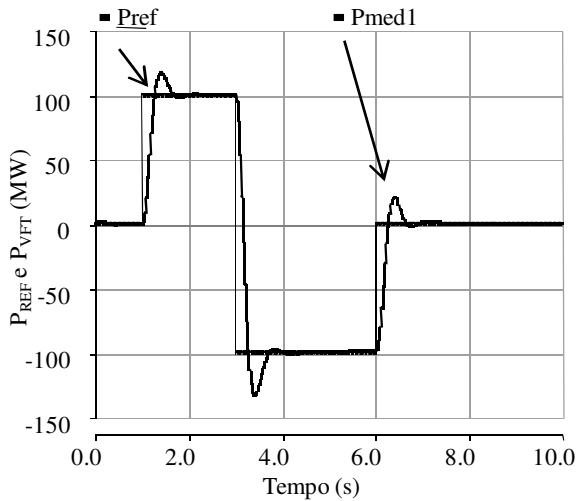


Fig. 15. $P_{REF}(t)$ e $P_{VFT}(t)$ – Degrau na referência do VFT.

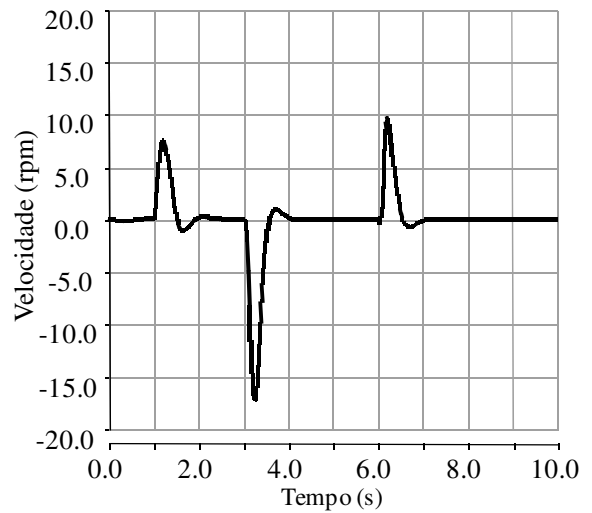


Fig. 18. Velocidade do rotor (rpm) – Degrau na referência do VFT.

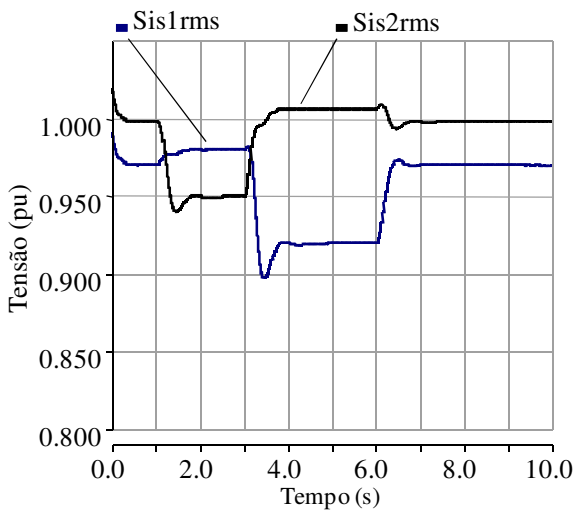


Fig. 16. Perfil de tensão – Degrau na referência do VFT.

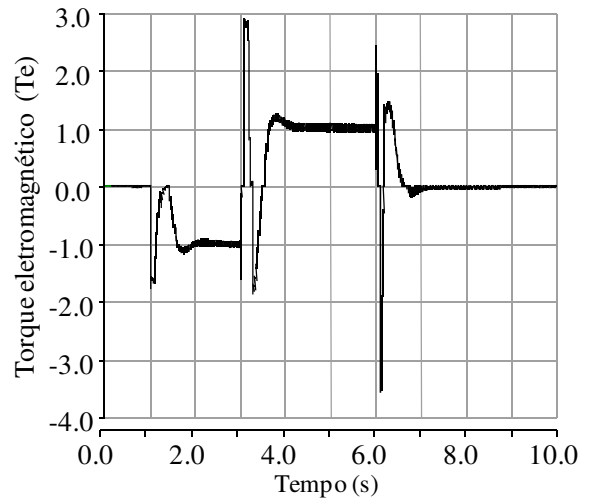


Fig. 19. Torque eletromagnético (pu) – Degrau na referência VFT.

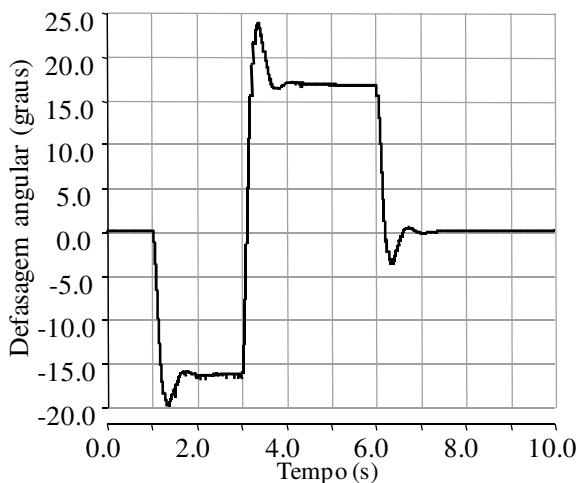


Fig. 17. Defasagem angular $\theta_{VFT}(t)$ – Degrau na referência do VFT.

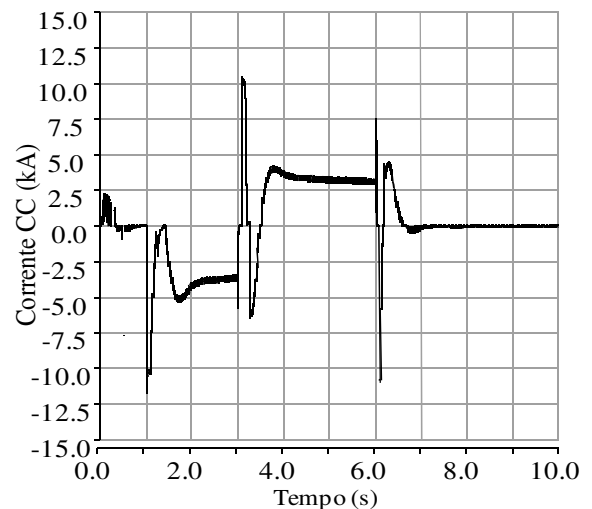


Fig. 20. Corrente CC (kA) – Degrau na referência VFT.

A velocidade do rotor do VFT está apresentada na Figura 18. Na Figura 19 está apresentado o torque eletromagnético produzido pela máquina CC. A Figura 20 apresenta a corrente CC fornecida pelos conversores à máquina CC.

O desempenho do sistema mostra-se adequado, considerando a estrutura de controle proposta. Os ajustes adotados agregam amortecimento suficiente às oscilações do rotor do VFT.

V. CONCLUSÕES

O VFT apresenta – naturalmente – torques em fase com os desvios angulares (torques de sincronismo), mesmo sem ação de controle. Esta característica, similar àquela observada nas máquinas síncronas, está associada à tendência de alinhamento dos campos do rotor e estator. Por outro lado, ficou demonstrado que o amortecimento das oscilações do rotor do VFT é quase nulo, sem ação de um sistema de controle adequado. Mesmo em malha fechada, controladores padrão tipo PI são incapazes de proporcionar amortecimento satisfatório às oscilações do rotor do VFT.

A utilização de sinais adicionais estabilizadores, baseados nos desvios da velocidade do rotor do VFT, agrega amortecimento suficiente ao sistema, conforme pode ser comprovado pelas simulações digitais apresentadas nas seções III e IV.

Deve-se ressaltar que as simulações apresentadas para fins de comprovação do desempenho do VFT foram feitas utilizando modelo digital detalhado, incluindo a representação da máquina rotativa principal e de seus controles, do conversor eletrônico e máquina de corrente contínua para controle do torque aplicado no eixo do VFT, bem como dos sistemas equivalentes.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Larsen, R. Piwko, D. McLaren, et al., “Variable Frequency Transformer – A New Alternative for Asynchronous Power Transfer,” presented at *Canada Power*, Toronto, Ontario, Canada, September 2004.
- [2] P. Doyon, D. McLaren, M. White, et al., “Development of a 100 MW Variable Frequency Transformer,” presented at *Canada Power*, Toronto, Ontario, Canada, September 2004.
- [3] M. Dusseault, D. Galibois, J. Gagnon, et al., “First VFT Application and Commissioning,” presented at *Canada Power*, Toronto, Ontario, Canada, September 2004.
- [4] D. Mc Nabb, D. Nadeau, A. Nantel, et al., “Transient and Dynamic Modeling of the New Langlois VFT Asynchronous Tie and Validation with Commissioning Tests,” presented at the *International Conference on Power System Transients*, Montreal, June 2005.
- [5] R. Piwko, E. Larsen, and C. Wegner, “Variable Frequency Transformer – A New Alternative for Asynchronous Power Transfer,” presented at *IEEE Durban*, South Africa, 2005.
- [6] P. Truman, and N. Stranges, “A Direct Current Torque Motor for Application on a Variable Frequency Transformer,” presented at the *IEEE PES General Meeting*, Tampa, FL, June 2007.
- [7] A. Merkhouf, S. Uphadayay, and P. Doyon, “Variable Frequency Transformer Electromagnetic Design Concept,” presented at the *IEEE PES General Meeting*, Tampa, FL, June 2007.
- [8] R. Yuan, Y. Chen, G. Chen, et al., “Simulation model and characteristics of variable frequency transformers used for grid interconnection,” *Power & Energy Society General Meeting*, 2009. PES '09, IEEE.

DADOS BIOGRÁFICOS

Antonio Felipe da Cunha de Aquino, nascido em Teresópolis, Brasil, em 13 de Junho, 1974. Concluiu os cursos de graduação e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ em 1999 e 2000, respectivamente. Em 2003 concluiu o curso de pós-graduação *latu sensu* em proteção de sistemas elétricos, pela UFRJ. De 1999 a 2000 trabalhou como pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL e participa como pesquisador colaborador, desde 1999, das atividades do Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão – LEMT, COPPE/UFRJ. Desde 2000 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, com análise de sistemas de potência. Suas áreas de interesse técnico são a estabilidade transitória de sistemas de potência, interligação de sistemas elétricos, eletrônica de potência, qualidade de energia e FACTS.

Arjan Carvalho Vinhaes, nascido no Rio de Janeiro, Brasil, em 08 de Fevereiro, 1980. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (2005) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, atuando desde 2005 no ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) na Gerência de Estudos Especiais, com análise de sistemas de potência e transitórios eletromagnéticos (TEM). Tem interesse pelas áreas de TEM, eletrônica de potência, FACTS e Sistemas de Potência.

Edson H. Watanabe, nascido no Estado do Rio de Janeiro, Brasil, em 07 de novembro de 1952. Concluiu os cursos de graduação em Engenharia Eletrônica e mestrado em Engenharia Elétrica em 1975 e 1976, respectivamente, na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Em 1981, obteve o grau de Doutor em Engenharia pelo Tokyo Institute of Technology, no Japão. Neste mesmo ano, tornou-se professor Adjunto e, em 1994, tornou-se professor Titular da COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, onde atua em Eletrônica de Potência. Seus principais campos de interesse são análise, modelagem e projeto de conversores, filtros ativos e tecnologias FACTS. Dr. Watanabe é membro do IEE-Japan, Sociedade Brasileira de Automática, Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência, CIGRE e as Sociedades de Engenharia de Potência, Aplicações Industriais e Eletrônica de Potência do IEEE. Em 2005, foi admitido na Ordem Nacional do Mérito Científico (Brasil). Atualmente, é Diretor para Assuntos Acadêmicos da COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Maurício Aredes nasceu em 1961. Tornou-se Engenheiro Eletricista em 1984 pela Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ. Em 1991, recebeu o título de M.Sc. em Engenharia Elétrica pela UFRJ. Em 1996, tornou-se Dr.-Ing. (Hons.) pela Technische Universität Berlin, Berlim-Alemanha. Atualmente, é Professor adjunto da Universidade Federal do Rio de Janeiro onde ensina Eletrônica de Potência. Suas áreas de pesquisas incluem sistemas HVDC, FACTS, filtros ativos, *custom power* e qualidade de energia.