

# Regulação Eletrônica pela Carga das Variáveis Elétricas e da Velocidade de Microgeradores Assíncronos

23.9317

César A. Portolann  
Félix A. Farret

## Resumo

O artigo mostra como um controle eletrônico pela carga pode ser exercido por conversores CC-CC para uso em micro-centrais elétricas assíncronas substituindo o controle mecânico convencional de velocidade e das variáveis elétricas: corrente, tensão e potência. A rotação do conjunto gerador-turbina é mantida dentro de certos limites através da modulação da potência ativa consumida, ao mesmo tempo que se consegue boa regulação de tensão, de corrente, de potência ou de impedância de cargas usando-se as características inerentes aos geradores assíncronos. O controle baseia-se no desvio da corrente que a carga não utiliza, para um conversor CC-CC que é ligado em paralelo com a carga principal, que pode ser tanto a rede pública como um outro conversor CC-CA ou uma carga DC. O reaproveitamento do excesso da corrente de linha é feito sobre uma carga secundária.

## INTRODUÇÃO

Em uma micro-central elétrica assíncrona, a diferença entre a corrente gerada e a consumida pela carga principal, pode ser usada para controlar a rotação e a tensão, corrente, potência ou impedância de carga. Essa técnica é conhecida como "controle pela carga".

O controle proposto para micro-central tem como principais características, o fato de ser totalmente eletrônico e por atuar exclusivamente na carga e não no fluxo de energia primária, tal como o controle eletromecânico convencional. A rotação do conjunto turbina-gerador e a variável elétrica a ser controlada são mantidas dentro de limites razoáveis<sup>[1,3]</sup>. Deve-se considerar as seguintes condições típicas:

- a) Se a energia primária na natureza variar (por exemplo, mais água ou mais vento), a rotação do conjunto gerador varia de

acordo. Então, o controle deve atuar para que a rotação não ultrapasse os limites estabelecidos;

- b) A regulação da variável elétrica de interesse mantém-se dentro de limites razoáveis, pelas características próprias dos geradores de indução cuja tensão de saída varia muito pouco quando alimentando cargas predominantemente resistivas.

## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um gerador assíncrono sem controle mecânico de rotação e de tensão e auto-excitado por capacitores, é ligado a uma ponte retificadora não controlada, a qual alimenta a carga principal e uma outra secundária, ambas conectadas em paralelo como mostra a Figura 1. Esta constitui-se no circuito equivalente da micro-central sob o ponto de vista do controle e dos valores médios de corrente, tensão, potência ou resistência. Portanto, o gerador assíncrono vê uma carga quase que puramente resistiva.

A corrente CA passando pela impedância da fonte causa uma queda no valor médio da tensão

César Augusto Portolann é Mestre em Sistemas Elétricos de Potência (UFSM) e professor do Cefet-PR, Unidade de Pato Branco.

Félix A. Farret é Doutor em Engenharia Elétrica (University of London) e professor da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

na carga. Assim, desprezando-se os harmônicos e levando em conta as relações entre  $V_{fase}$  e  $I_{dc}$ , obtém-se [5]:

$$V_{dc} = V_{do} - R_c I_{dc} \quad (1)$$

onde:  $R_c$  é a resistência equivalente do retificador, que inclui a resistência de comutação, a resistência dos enrolamentos do gerador, as resistências dos diodos e as resistências das conexões. O valor de  $V_{do}$  está estreitamente relacionado com a rotação da máquina primária que, por sua vez, depende do balanço da quantidade de energia disponível na natureza com a demanda de energia do gerador.

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} V_{fase}$$

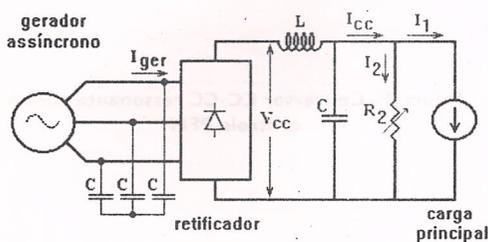


Fig. 1 - Princípio de funcionamento do Controle Eletrônico pela carga

A Equação 1 expressa  $V_{dc}$  como uma função de  $I_{dc}$  e das quedas internas de tensão na resistência de comutação. Assim, controlando-se a corrente média na saída do retificador, está se controlando a carga no gerador e, como consequência, a rotação do conjunto gerador.

A resistência variável em paralelo com a carga principal, controla em PWM ou PFM o excesso de corrente que esta rejeitar. O importante, então, é controlar  $I_{dc}$  para poder controlar a rotação do grupo turbina-gerador e a tensão  $V_{dc}$  para se poder controlar a tensão na carga [1,3]. A seguir discutem-se os três casos de maior interesse para controle pela carga: corrente, tensão e potência.

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, discutem-se as formas de implementação dos controles de tensão do gerador assíncrono e de sua rotação pelas variáveis elétricas de saída (carga) através de resultados advindos da simulação do controle proposto. Os re-

sultados de laboratório até o presente momento corroboram os pontos teóricos ora levantados. Por simplificação, a carga principal foi substituída por uma fonte de corrente, conforme Figura 2. O circuito de bloqueio para o controle PFM a ser utilizado foi a ressonante série, cuja largura do pulso  $W$  é determinada por:  $\pi \sqrt{LC}$ . As características do tiristor usado para o circuito de chaveamento é o fator limitante na seleção da frequência máxima de chaveamento.

#### 1) Controles da Tensão do Gerador e da Rotação pela Corrente de Carga<sup>[2,3]</sup>

A Figura 2 mostra o princípio básico de chaveamento adotado para o conversor CC-CC, como modulação PWM. A modulação da resistência eficaz, cujo valor real é  $R_2$ , controla a corrente  $I_2$  que deve ser desviada da carga principal para poder controlar a corrente  $I_{dc}$  e/ou a da carga principal. Da mesma forma, para manter-se a corrente na carga principal  $I_1$  constante, frente a uma variação de energia primária, deve-se desviar o seu excesso com variações idênticas na corrente do conversor CC-CC  $I_2$ , porém com sinal contrário. Se ambas, a corrente gerada,  $I_{dc}$ , e  $I_1$  variarem, o conversor CC-CC deve compensá-las conforme a necessidade. Tudo funciona como se não houvesse dependência entre as correntes  $I_1$  e a corrente gerada.

A partir da Figura 2, vê-se que:

$$I_{dc} = I_1 + I_2 \quad (2)$$

onde:

- $I_{dc}$  é a corrente média no laço CC,
- $I_1$  é a corrente média na carga principal e,
- $I_2$  representa a corrente média na carga secundária.

Desta forma, variações de corrente na carga devem ser compensadas com variações de corrente pela resistência variável obtidas pela modulação em PWM de uma resistência eficaz com uma razão cíclica ("duty cycle") definida como:

$$D = \frac{W}{T_{ch}} \quad (3)$$

onde:  $W$  é a largura do pulso de corrente no conversor CC-CC;  $T_{ch}$  é o período de chaveamento do conversor CC-CC e  $F_{ch}$  é a frequência de chaveamento. A corrente no conversor CC-CC é dada por:

$$I_2 = \frac{D \times V_{dc}}{R_2} \quad (4)$$

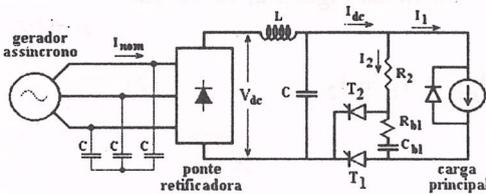
onde  $R_2$  é a resistência real. A resistência secundária efetiva é:

$$R_{2ef} = \frac{R_2}{D} \quad (5)$$

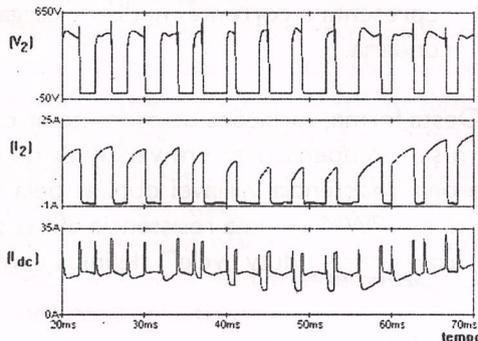
Combinando-se as equações 1 a 5, pode-se obter a variável de controle  $W$ , que modula o valor da resistência secundária:

$$W = \frac{R_2}{F_{ch} \times V_{dc}} (I_{dc} - I_1) \quad (6)$$

O circuito da Figura 2(a) utiliza o conversor CC-CC com os tiristores, funcionando no modo chaveado. Sua função é controlar a quantidade (nível médio) de corrente drenada da carga principal para a secundária. Na Figura 2(b) mostram-se as diversas formas de onda obtidas para um caso de inserção e rejeição de carga, respectivamente, em 35 ms e em 55 ms.



(a) - Controle V-F PWM.



(b) - Testes de Inserção e Rejeição de carga

Fig. 2 - Micro-central elétrica assíncrona com controle pela carga

Deve-se observar que na Figura 2 liga-se o resistor  $R_2$  em série com um tiristor que conduz e bloqueia periodicamente o circuito com corrente contínua. Pode-se, assim, variar a resistên-

cia, desde o valor nominal  $R_2$  até  $\infty$  através da variação da relação entre o tempo que o tiristor conduz e o período de chaveamento. Isto é, quando o tiristor está bloqueado, a resistência é aproximadamente um circuito aberto e quando conduz integralmente, o resistor variável tem nesse momento o seu valor mínimo,  $R_2$ .

### II) Controles da Tensão do Gerador e da Rotação pela Tensão de Carga

O regulador de tensão neste caso pode ser simplificado conforme a Figura 3. Partindo-se da Equação (1) e baseados na mesma figura, vê-se que:

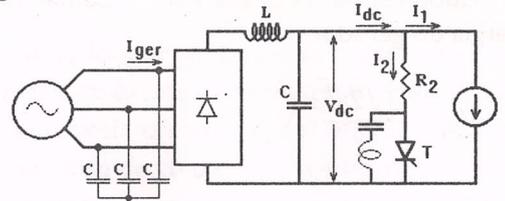


Figura 3 - Conversor CC-CC ressonante para o controle PFM

$$V_{dc} = \frac{R_p}{R_p + R_c} V_{do} \quad (7)$$

Porém,  $R_{2ef} = R_2/WF_{ch}$ , onde:  $R_p$  é o paralelo entre uma resistência equivalente a carga principal,  $R_1$ , representada pela fonte de corrente,  $R_2$  é a carga secundária e  $R_{2ef}$  é o seu valor eficaz. A frequência de chaveamento é limitada pelo valor  $F_{ch} = 1/W$ . Assim sendo, a partir da Equação 7:

$$V_{dc} = \frac{R_1}{\frac{R_c R_1}{R_2} WF_{ch} + R_1 + R_2} V_{do} \quad (8)$$

Analisando-se a Equação (8) pode-se notar que para se ter maior sensibilidade no ajuste de tensão é necessário que:

a)  $R_2$  tenha um valor mínimo. O ideal seria  $R_2 \rightarrow 0.0$ . Porém, o nível de corrente no dispositivo de chaveamento seria praticamente inaceitável. Um valor razoável seria 10.0  $\Omega$ .

b) Nos casos práticos,  $R_c$  é pequeno. Nos geradores usados em micro-centrais, este valor é em torno de 3.0  $\Omega$ .

c) A faixa de definição para  $WF_{ch}$  é:  $0 < WF_{ch} < 1$  sendo que o valor máximo possível de  $F_{ch}$  é  $1/W$ . Como se vê, é irrelevante o valor de  $W$  sob o ponto de vista da regulação, apesar de ser acentuada a geração de harmônicos para valores muito pequenos desta variável.

Uma plotagem da Equação (8) é mostrada na Figura 4 para  $R_1 = 28 \Omega$ ,  $R_2 = 2 \Omega$  e  $R_c = 2.388 \Omega$ . Com se pode ver, a faixa de regulação de tensão é bastante ampla entre 480 e 825 Hertz. Com isto consegue-se bastante flexibilidade para manter-se constante o valor de  $V_{dc}$  mediante o ajuste fino da frequência de chaveamento. Além do mais, pode-se variar também a rotação do gerador por estar-se atuando diretamente sobre a potência ativa.

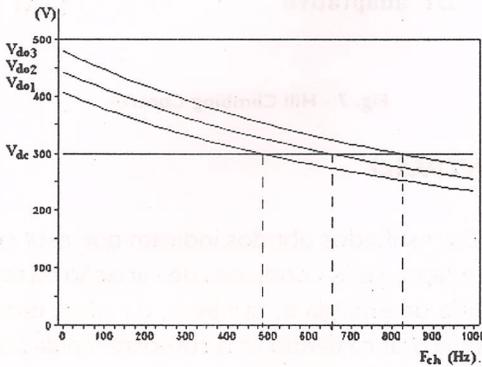


Fig. 4 - Controle para tensão constante de carga

**III) Controles da Tensão do Gerador e da Rotação pela Potência de Carga**

Uma outra alternativa de controlar-se a rotação simultaneamente com a tensão de carga é o controle de potência. Partindo-se novamente da Equação 1, a potência média na carga é dada por:

$$P = (V_{do} - R_c I_{dc}) I_{dc} \tag{9}$$

Além do mais:  $I_1 = V_{dc}/R_1$  e  $I_2 = I_{dc} WF_{ch}$  e pela Equação 2, tem-se:

$$I_{dc} = \frac{V_{do}}{R_c + \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_1 WF_{ch}}} \tag{10}$$

Substituindo-se a Equação (10) em (9) e rearranjando-se vem:

$$P = \frac{(R_1 WF_{ch} + R_2) R_1 R_2 V_{do}^2}{[(R_1 WF_{ch} + R_2) R_c + R_1 R_2]^2} \tag{11}$$

A equação acima, pode ser apresentada também na forma:

$$P = \frac{\frac{R_1 WF_{ch} + R_2}{R_1 R_2} V_{do}^2}{\left[ \left( \frac{R_1 WF_{ch} + R_2}{R_1 R_2} \right) R_c + 1 \right]^2} \tag{12}$$

Levando em conta os valores encontrados na prática, pode-se fazer uma análise simplificada da Equação (12). Isto é, se  $R_c$  for muito pequeno e  $R_1 R_2 \gg (R_1 WF_{ch} + R_2)$ , o denominador torna-se aproximadamente igual à unidade e a Equação (12) toma a forma abaixo:

$$P \cong \left( \frac{1}{R_2} WF_{ch} + \frac{1}{R_1} \right) V_{do}^2 \tag{13}$$

Para as condições dadas, a Equação (12) aproxima-se de uma reta que corta o eixo das abcissas no ponto **P** com inclinação sempre positiva dados por:

$$P = V_{do}^2 / R_1 \quad e \quad \tan(\theta) = \frac{V_{do}^2 W}{R_2} \tag{14}$$

A plotagem da Equação (12) na Figura 5 mostra como é possível manter-se constante a potência na carga ao mesmo tempo que se tem controle sobre a potência ativa total sendo absorvida do gerador assíncrono. Para uma variação de 230 a 640 Hertz a flexibilidade de controle é suficiente para uma ampla variação de energia primária. Tais características são muito importantes quando relacionadas com o uso do "Hill Climbing Control" para extração da máxima potência da fonte primária conforme discutido na seção seguinte.

**OPERAÇÃO COM MÁXIMA POTÊNCIA DE GERAÇÃO**

Num sistema convencional de geração de energia elétrica, a demanda de potência é geralmente menor do que a máxima potência disponível.

vel na fonte, desprezando-se as perdas internas. Um caso típico em que a operação em máxima potência gerada é requerida, é a geração assíncrona com controle pela carga. O projeto da micro-central e a sua operação permitem que a máxima potência gerada seja transferida à carga. O ponto de operação (PMPG - ponto de máxima potência gerada) é determinado pela interseção das curvas características da fonte de energia e da carga.

Esse ponto de interseção varia no tempo com a fonte ou com a carga.

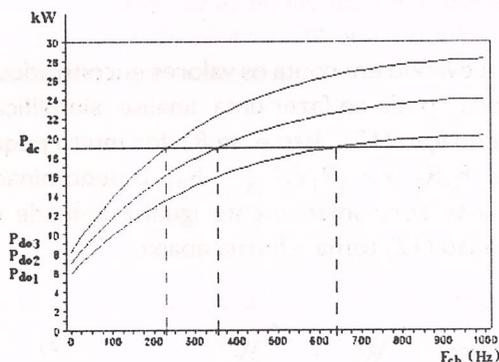


Fig. 5 - Controle de potência de carga constante

A procura do ponto de máxima potência gerada justifica-se pelo fato de que se a energia não for utilizada no momento em que estiver disponível na natureza, a mesma será desperdiçada.

Para alcançar o PMPG, um casamento entre gerador-carga deve ser requerido. Assim, a carga deverá ser acoplada à fonte através de um dispositivo chamado conversor eletro-eletrônico, como mostra a Figura 6. Se os parâmetros da fonte e a potência de saída forem modificados, o circuito de acoplamento deverá também variar de acordo.

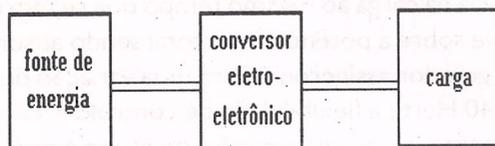


Fig. 6 - Esquema geral de um sistema de geração

Do processamento dos sinais oriundos de sensores, são determinadas as condições de carga e de energia primária disponíveis. Como resultado é gerado um contínuo incremento (ou decremento) na corrente da fonte. Assim, o ponto de máxima potência gerada pode ser atingido, usando-se o algoritmo "Hill Climbing Control" que estabiliza o funcionamento no PMPG, em torno do qual ficará oscilando, até que se modifi-

quem as condições de funcionamento da micro-central (nível d'água, vazão, velocidade do vento, etc.).

A Figura 7 ilustra a forma geral da característica de potência de saída do gerador de indução e como atua o algoritmo de controle, "Hill Climbing Control". Neste caso, o conversor CC-CC faz a função de dispositivo acoplador entre geração e carga através da variável de controle  $F_{ch}$ .

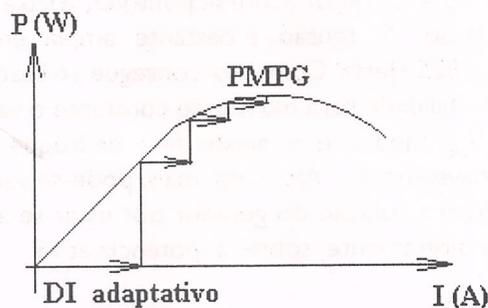


Fig. 7 - Hill Climbing Control

## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que este controle adapta-se às condições de variação na fonte primária de energia e, também, da carga encontradas na prática dando uma resposta rápida (tempo real) para as situações esperadas. Ele é adaptável a qualquer tipo de fonte primária e de carga, possibilitando a regulação de uma ampla faixa de variação da rotação, das correntes, das tensões e das potências envolvidas.

A utilização de uma resistência variável em paralelo com a carga principal para controle da rotação e da tensão do gerador assíncrono oferece muitas características desejáveis para microcentrais, tais como, robustez, simplicidade e redução de custos, de volume e de peso, se comparado com o controle eletromecânico convencional. Por ser eletrônico e compacto, este controle tem a possibilidade de ser montado em qualquer posição. O uso de um microcontrolador garante aos circuitos de controle das microcentrais uma ótima imunidade à umidade, poeira, más conexões, fiação complexa e flexibilidade além de permitir uma resposta rápida e adaptativa, traduzindo-se numa energia gerada de boa qualidade, em se falando do nível de tensão.

Os resultados obtidos até agora permitem concluir-se que com poucas modificações no circuito de controle, consegue-se uma boa regulação e tensão e potência além, é claro, do controle de rotação através da potência ativa. Estas duas variáveis parecem ser as mais apropriadas para

micro-centrais em relação ao controle de corrente porque necessitam menos componentes e, de vantagem, oferecem uma regulação mais estreita de tensão para as cargas primária e secundária.

A modulação do valor efetivo de um resistor como carga secundária é compatível com qualquer tipo de carga principal, que poderá ser a rede pública, um conversor CC-CA, uma carga CC ou a combinação deles.

## REFERÊNCIAS

- [1] Bonert, R., Hoops, G., "Stand Alone Induction Generator with Terminal Impedance Controller and no Turbine Controls", IEE Proc. B, 1990.
- [2] Farret, F. A., Mello, C. D., "Melhorias na Estrutura e Operação de uma Micro-usina Experimental com Controle Eletrônico pela Carga", XII Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, PE, Anais CIGRÉ, Out./93.
- [3] Farret, F. A., Prado, R. N., Portolann, C. A., "DC-DC converters for simultaneous speed and voltage control by the load in asynchronous generation", 3<sup>rd</sup> Brazilian Power Electronics Conference - COBEP'95, pp 589-593, Dez./95.
- [4] Rashid, M. H., "Power Electronics". Livro, Prentice Hall International Editions, 1993.