

# Método Analítico para Cálculo de Resistência Ótima na Energização de Geradores de Indução com Rotor Gaiola de Esquilo

Ahda P. Grilo, *Student Member, IEEE*, Walmir Freitas, *Member, IEEE*, Carlos A. F. Murari, *Member, IEEE*, André L. Morelato França, *Member, IEEE*

**Abstract**-- This paper presents a set of formulas that determines the optimum resistor size to be used in the energization of squirrel-cage induction generators. The analytical formulation is based on the mitigation of maximum peak inrush current during the connection of induction generators to the system through the insertion of resistors in series. The approach also mitigates the voltage sags in the grid, that usually is a very restrictive constrain to the connection of squirrel-cage induction generators.

**Index Terms**-- Energization of induction generator, maximum peak inrush current, optimum resistor size.

**Resumo**-- Este artigo apresenta o desenvolvimento de expressões analíticas para obtenção do valor ótimo de resistor a ser utilizado durante a energização de geradores de indução com rotor em gaiola de esquilo. A formulação analítica é baseada na minimização do valor de pico da corrente durante a conexão do gerador de indução à rede através de resistores série. O uso do resistor ótimo também minimiza os afundamentos de tensão na rede durante a energização do gerador, os quais costumam limitar a instalação de geradores de indução na rede elétrica.

**Palavras-chave**-- Energização de geradores de indução, máxima corrente de energização, valor ótimo de resistor.

## I. INTRODUÇÃO

RECENTEMENTE, o interesse por geração distribuída tem aumentado consideravelmente [1]-[3]. Neste contexto, geradores de indução conectados diretamente à rede de energia elétrica tem sido empregados em centrais hidrelétricas, térmicas e eólicas de pequeno e médio porte [1], [4]-[7]. Embora, haja um crescente interesse no uso de geradores de indução duplo alimentados, os geradores de indução com rotor em gaiola de esquilo continuam sendo bastante utilizados devido à simplicidade, robustez e baixos custos de instalação e manutenção, o que os tornam atrativos para pequenos e médios produtores.

No entanto, ao contrário do gerador síncrono, um gerador de indução só começa a produzir tensão em seus terminais após sua conexão com a rede elétrica, o que provoca severos

transitórios de corrente no instante da conexão. Esta corrente é denominada corrente de partida ou de energização (*inrush*) e, tipicamente, seu valor máximo é diversas vezes maior que a corrente nominal do gerador. Por conseguinte, no instante de energização do gerador, severos afundamentos de tensão podem ocorrer, o que é um fenômeno altamente indesejável em instalações industriais modernas [8].

Em [9] é apresentado um método para minimização das correntes de energização durante a conexão dos geradores de indução, o qual consiste na conexão de resistores em série entre o gerador de indução e a rede elétrica. Este método consiste em uma alternativa para o método do *soft-starter*, cuja utilização pode resultar em problemas de qualidade de energia tendo em vista que suas correntes resultantes são altamente distorcidas, e, por conseguinte, o banco de capacitores deve ser desconectado, requisitando ainda mais potência reativa da rede.

Desta forma, o método dos resistores apresenta uma alternativa economicamente vantajosa, uma vez que o custo de instalação de resistores é menor que o custo de instalação de *soft-starters*. Além disso, na energização de geradores de indução por resistores não é necessária a desconexão do banco de capacitores.

No entanto, a eficácia do método de energização pelo uso de resistores depende consideravelmente dos valores dos resistores empregados, sendo que em [9] não se aborda como obter tais valores. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento analítico de uma metodologia para obtenção do valor ótimo dos resistores. São desenvolvidas fórmulas analíticas para obtenção do valor de resistência ótima do resistor a ser empregado pelo método, as quais são validadas por resultados obtidos através de simulações.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na seção II apresenta-se uma análise sobre métodos de conexão de geradores de indução. Na Seção III analisa-se o método dos três resistores série. Na Seção IV desenvolve-se a metodologia analítica para obtenção do resistor ótimo. A Seção V contém os resultados, seguida pela Seção VI com o cálculo da energia dissipada pelos resistores e pela Seção VII com as conclusões.

## II. MÉTODOS DE CONEXÃO DE GERADORES DE INDUÇÃO À REDE

Tendo em vista que os afundamentos de tensão são decorrentes das altas correntes de energização, uma prática

---

Este trabalho foi financiado pela FAPESP.

Ahda P. Grilo, W. Freitas, Carlos A. F. Murari e André Morelato França fazem parte do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, UNICAMP, C.P. 6101, 13083-852, Campinas, Brasil (e-mails: ahda.grilo@ieeee.org, walmir@ieeee.org, murari@dsee.fee.unicamp.br, morelato@dsee.fee.unicamp.br).

comum para determinar a possibilidade de instalação de um gerador de indução à rede é a análise dos afundamentos de tensão provocados durante a energização do gerador [8].

A energização do gerador de indução duplo alimentado é realizada com o controle das correntes e tensões do rotor, de forma que as tensões induzidas nos enrolamentos do estator fiquem sincronizadas com as tensões da rede. Tal procedimento é apresentado em [10]. A utilização desse método permite que a conexão ocorra em qualquer velocidade do rotor.

Embora a conexão do gerador de indução duplo alimentado com a rede seja bastante eficaz, o custo total da máquina de indução com rotor bobinado, incluindo os dispositivos de chaveamento, tornam essa alternativa extremamente cara. Com isso, é mais comum encontrar geradores de indução com rotor gaiola de esquilo, por ser uma alternativa mais econômica.

Os métodos apresentados na literatura com o objetivo de minimizar as correntes de energização de geradores de indução com rotor gaiola de esquilo consistem na aplicação de um valor reduzido de tensão ao gerador, seja através de um *soft-starter* [11], ou através da conexão de resistores, chamado método dos três resistores em série [9].

O princípio de funcionamento da metodologia de conexão do gerador de indução com uso de um *soft-starter* é energizar a máquina através de um aumento gradual na tensão aplicada ao estator, limitando, desta forma, a corrente de partida. Uma desvantagem deste método é que as correntes resultantes são altamente distorcidas, e por conseguinte, o banco de capacitores que usualmente é ligado aos terminais do gerador deve ser momentaneamente desconectado, tendo em vista que a grande maioria dos bancos de capacitores atuais não suporta as harmônicas criadas pelo *soft-starter* [11]. Assim, em geradores com maior capacidade de potência, esse método pode levar a momentâneos, mas importantes, problemas com a qualidade de energia.

O método dos três resistores em série, apresentado em [9], baseia-se na conexão de três resistores ligados em série, um em cada fase, entre a rede e o gerador de indução, conforme mostrado na Fig. 1. O processo de energização da máquina consiste primeiramente em fechar a chave 1, sendo que, neste instante, os resistores estarão em operação diminuindo a corrente. Após algum tempo, os resistores são curto-circuitados (*bypassed*) através do fechamento da chave 2. A conexão dos resistores, da mesma forma que o *soft-starter*, diminui a tensão aplicada à máquina durante a energização.

A energização por resistores série deve ser realizada com a velocidade do rotor ligeiramente superior à velocidade síncrona da rede, pois no momento da conexão a velocidade do rotor sofre uma leve diminuição, resultando numa velocidade igual à velocidade da rede. Este procedimento é realizado através do uso de um relé de velocidade, que atua fechando o circuito quando a velocidade do rotor atinge o valor desejado [8]. A energização do gerador com a velocidade do rotor próxima a velocidade síncrona da rede tem como objetivo minimizar a duração dos transitórios de corrente no instante da conexão.

A principal vantagem do método dos resistores é que o banco de capacitores pode continuar conectado durante o processo de energização da máquina, visto que não há grandes distorções nas correntes e tensões da rede. Por outro lado, a principal desvantagem é que há dois transitórios de corrente, um no momento da energização da máquina (fechamento da chave 1) e outro no instante em que os resistores em série tornam-se inoperantes (*bypassed*) pelo fechamento da chave 2.

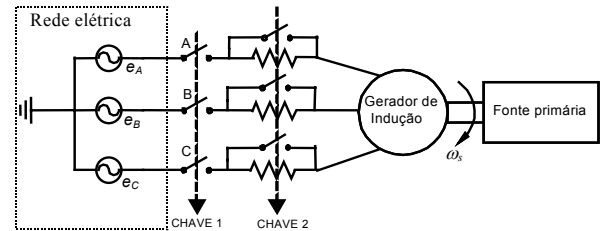


Fig. 1. Método dos três resistores em série.

A Fig. 2 apresenta a corrente da fase A, obtida por simulação, durante a energização do gerador de indução mencionado anteriormente utilizando um resistor de  $0,3 \Omega$ . Na simulação, o gerador foi conectado através do resistor diretamente a uma subestação com potência de curto-circuito infinita. No momento da conexão, o rotor do gerador apresentava velocidade igual à velocidade síncrona da rede, sendo mantido no controle de velocidade durante o processo. O primeiro chaveamento foi realizado após 0,2 segundos de simulação e o segundo chaveamento foi realizado após 1,0 segundo de simulação.

Os valores de corrente do primeiro chaveamento devem ser comparados aos valores de corrente da conexão direta do gerador, que é de 8,0 kA, desta forma com a utilização deste resistor a corrente de energização passou de 8 kA para 1,5 kA.

No entanto, utilizando o método apresentado, o segundo chaveamento também produz um transitório na corrente da máquina. O transitório devido ao segundo chaveamento é proporcional ao valor do resistor curto-circuitado, uma vez que a queda de tensão que havia sobre o resistor será o estímulo de tensão responsável pelo transitório de corrente.

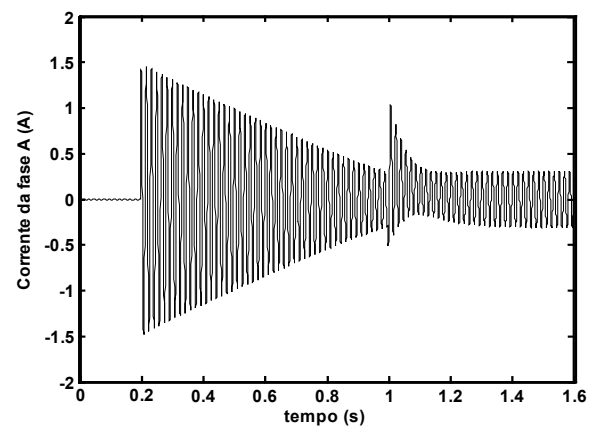


Fig. 2. Energização com resistores em série.

Desta forma, o valor máximo de corrente do primeiro transitório é menor quanto maior for o valor do resistor inserido, enquanto que, de modo contrário, o valor máximo de

corrente do segundo transitório é maior quanto maior for o valor de resistor empregado. Portanto, a eficácia do método de energização pelo uso de resistores depende consideravelmente dos seus valores de resistência. Neste trabalho, é realizada uma análise mais detalhada com respeito ao valor do resistor a ser aplicado para minimização da corrente de energização.

### III. MÉTODO DOS TRÊS RESISTORES SÉRIE

O máximo valor da corrente de energização depende dos parâmetros da rede, dos parâmetros do gerador, dos valores dos resistores e do instante de fechamento da chave. De maneira conservadora, as análises para obtenção dos máximos valores de corrente devem ser baseadas no pior caso, isto é, deve ser considerado que os chaveamentos foram realizados no instante que provoca o maior pico de corrente.

Considerando que o instante de fechamento selecionado corresponde ao pior cenário, cada valor de resistor fornecerá um máximo valor de corrente em um dado sistema para cada chaveamento, que podem ser representados conforme:

$$I_{1\max} = f_1(R_{se}, Y) \quad (1)$$

e

$$I_{2\max} = f_2(R_{se}, Y) \quad (2)$$

sendo que:

$I_{1\max}$  = valor máximo de corrente devido ao primeiro chaveamento (A);

$I_{2\max}$  = valor máximo de corrente devido ao segundo chaveamento (A);

$R_{se}$  = resistência série ( $\Omega$ );

$Y$  = demais parâmetros do gerador e da rede elétrica, tais como resistências e reatâncias da máquina, tensões da rede.

O máximo valor de corrente para o primeiro e segundo chaveamentos para uma máquina em um determinado sistema são funções somente da resistência série empregada, visto que os demais parâmetros permanecem os mesmos.

Tendo em vista que uma alteração no valor do resistor série empregado apresenta efeito oposto para as curvas de máximo valor de corrente para ambos chaveamentos, o valor de resistor que fornecerá o ponto ótimo é dado pela resistência em que o valor máximo de corrente para o primeiro e segundo chaveamentos são iguais, ou seja:

$$I_{1\max}(R_{se} = R_{\text{ótimo}}) = I_{2\max}(R_{se} = R_{\text{ótimo}}) \quad (3)$$

em que  $R_{\text{ótimo}}$  representa o valor ótimo de resistência.

Com isso podem ser construídas as curvas de máximo valor de corrente em função do resistor empregado. Essas curvas são obtidas através de simulações eletromagnéticas em que para cada valor de resistor empregado, a energização do gerador é simulada para o primeiro e segundo passos. Nas simulações de ambos os passos, para cada valor de resistor foram considerados instantes diferentes de fechamento das chaves. Sendo que, selecionou-se para cada resistor o máximo valor de pico de corrente encontrado para os diferentes instantes de fechamento das chaves.

Na Fig. 3 tem-se o diagrama unifilar do sistema teste simulado. Este sistema é composto de uma máquina de indução com potência de 2MVA com um resistor série em

cada fase, que podem ser curto-circuitados pela chave 2 (Ch2). A máquina de indução é conectada ao sistema através da chave 1 (Ch1) no ponto de conexão PC. Os parâmetros da rede são representados pela resistência,  $R_L$ , e reatância da linha,  $X_L$ , e a tensão da fonte é a tensão da subestação. Os resultados das simulações são apresentados na Fig. 4. Os valores dos parâmetros utilizados encontram-se no Apêndice.

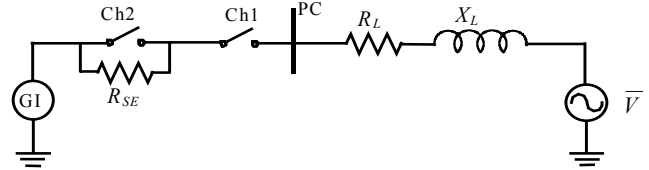


Fig. 3. Diagrama unifilar da rede teste.

Através da Fig. 4 observa-se que a intersecção das curvas ocorre no ponto  $(0,5\Omega; 0,88\text{kA})$ , que corresponde respectivamente ao valor ótimo do resistor e ao máximo valor de corrente durante a energização dessa máquina.

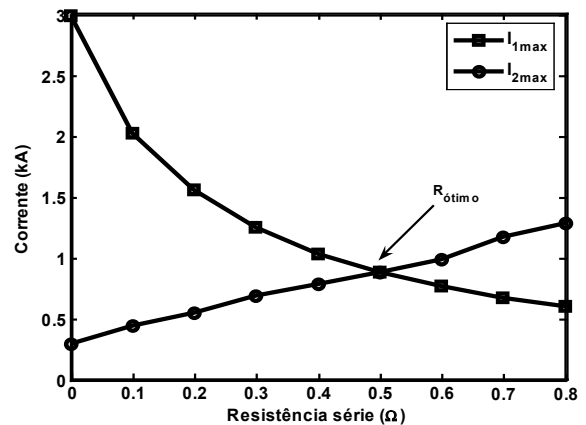


Fig. 4. Curvas de máxima corrente de energização em função do resistor série.

A Fig. 5 apresenta as respostas de corrente e tensão para a energização desse gerador de indução utilizando o resistor encontrado como resistor ótimo e a Fig. 6 apresenta a corrente e tensão durante a energização sem uso de resistor, isto é, com conexão direta.

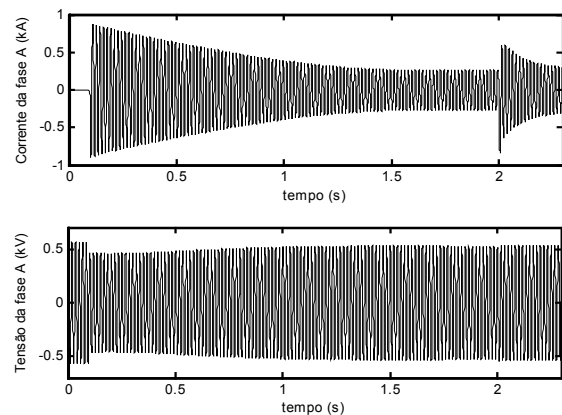


Fig. 5. Corrente e tensão durante energização com resistor ótimo de  $0,5 \Omega$ .

Como é possível observar, a magnitude do afundamento de tensão é consideravelmente maior quando não é utilizado um

resistor no acoplamento entre o gerador e a rede, enquanto que, quando utilizado o resistor série de valor ótimo a amplitude do afundamento de tensão é muito pequena.

Tendo em vista que o procedimento usado para obtenção do valor de resistor série ótimo é baseado numa série de simulações, um passo adiante consiste na obtenção de fórmulas analíticas que forneçam diretamente o valor ótimo de resistor série.

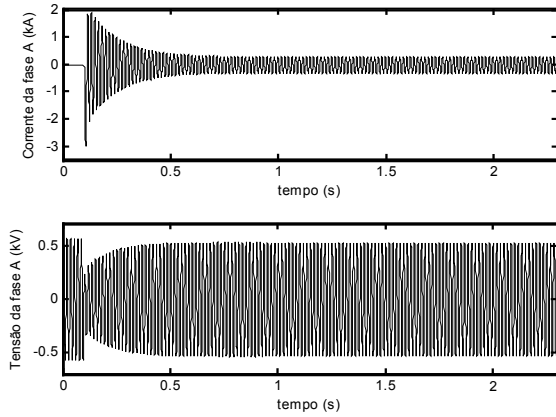


Fig. 6. Corrente e tensão durante energização sem utilização de resistor.

#### IV. FORMULAÇÃO ANALÍTICA DAS CURVAS DE CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO

A formulação analítica para determinação das curvas de corrente de energização do gerador de indução depende da resposta transitória da corrente da máquina de indução.

Principalmente para análises de curto-circuito, o método mais difundido para descrever o comportamento da corrente transitória de uma máquina consiste em caracterizar a resposta da máquina por reatâncias e constantes de tempo [12]. As reatâncias permitem o cálculo da componente de c.a. das correntes transitórias e as constantes de tempo caracterizam a taxa de decaimento exponencial da componente c. c.

A componente c.c. corresponde a uma constante multiplicada por uma função exponencial decrescente, do mesmo modo que a componente c.c. de um circuito RL simples. O valor da constante da componente c.c. está relacionado com o instante de chaveamento.

A componente alternada da corrente transitória de uma máquina de indução nos primeiros instantes é obtida através da reatância subtransitória. Caso o transitório seja proveniente de um curto-circuito, o valor de regime da corrente será nulo, enquanto que, se o transitório ocorre devido a apenas um distúrbio, o valor de regime da corrente será proporcional à impedância de regime da máquina. A reatância subtransitória da máquina ( $X'$ ) corresponde à reatância de rotor travado [13], que é calculada por:

$$X' = X_1 + \frac{X_m X_2}{X_m + X_2} \quad (4)$$

em que:

- $X_1$  = reatância de dispersão do estator da máquina;
- $X_2$  = reatância de dispersão do rotor da máquina;
- $X_m$  = reatância de magnetização da máquina.

Uma vez calculada a componente alternada da corrente transitória da máquina, seu valor de pico depende da componente de corrente contínua. O máximo valor de pico da corrente transitória de um sistema pode ser calculado pela multiplicação da componente alternada por um fator  $K$ , o qual é utilizado pela norma ANSI<sup>1</sup> [14]. Embora, o principal uso deste fator seja para o caso de um curto-circuito no sistema, a corrente transitória de uma máquina de indução durante a energização apresenta a mesma dinâmica que aquela observada durante um curto-circuito. O fator de multiplicação ( $K$ ) para obtenção do máximo valor de pico da corrente depende da relação  $R/X$  do sistema e é calculado por [14]:

$$K = \sqrt{2} \left( 1,0 + \text{sen}(\varphi) e^{-(\varphi + \pi/2)R/X} \right) \quad (5)$$

em que:

- $X$  = reatância equivalente do sistema;
- $R$  = resistência equivalente do sistema;
- $\varphi = \tan^{-1}(X/R)$ .

Para o primeiro chaveamento do método dos três resistores em série, a fórmula utilizada para a obtenção da primeira curva de corrente em função de resistência é dada por:

$$I_{1\max}(R_{se}) = K(R_{se} + R_1, X') \frac{\|\bar{V}\|}{\sqrt{X'^2 + (R_{se} + R_1)^2}} \quad (6)$$

sendo,

$I_{1\max}(R_{se})$  = valor da máxima corrente de energização do primeiro chaveamento em função da resistência série;

$\|\bar{V}\|$  = módulo de tensão rms aplicada à máquina;

$K(R_{se} + R_1, X')$  = fator de multiplicação para obtenção do valor de pico da corrente calculado por (5);

$R_{se}$  = resistência série empregada;

$R_1$  = resistência do estator;

$X'$  = reatância subtransitória da máquina.

A expressão para determinar o valor máximo da corrente devido ao segundo chaveamento é baseada no princípio da superposição [15]. No instante do chaveamento a chave é representada por duas fontes de tensão em série, exemplificado pelo circuito da Fig. 7. Esta representação baseia-se no fato que antes do segundo chaveamento existe uma tensão aplicada sobre a chave idêntica à tensão sobre o resistor. Após o chaveamento esta tensão torna-se zero e pode ser representada por duas fontes de tensão opostas de mesmo valor ( $\Delta\bar{V}$ ). Aplicando-se o teorema da superposição, esse circuito pode ser representado pela soma de dois circuitos, os quais são apresentados na Fig. 8. Dessa forma, a corrente total devido ao segundo chaveamento será a soma das correntes dos dois circuitos apresentados na Fig. 8.

Nota-se que a corrente do primeiro circuito é a mesma corrente referente ao primeiro chaveamento, por conseguinte, já está em regime permanente. E a corrente referente ao segundo circuito representa a parcela de corrente responsável pelo transitório da corrente. Esta corrente pode ser calculada pela obtenção de  $\Delta\bar{V}$  e resolução do circuito com os

<sup>1</sup> American National Standard Institute

parâmetros da máquina.

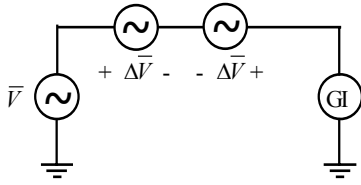


Fig. 7. Circuito equivalente após o segundo chaveamento.

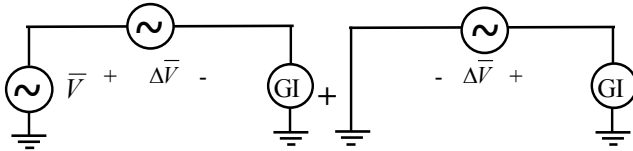


Fig. 8. Representação por superposição do circuito após o segundo chaveamento.

Como o segundo chaveamento é realizado quando o circuito está em regime permanente, a tensão sobre o resistor deve ser calculada com a corrente em regime, que é dada por:

$$\bar{I}_{1reg} = \frac{\bar{V}}{R_{se} + R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (7)$$

sendo  $\bar{I}_{1reg}$  a corrente de regime após o primeiro chaveamento.

A corrente de regime permanente é calculada desprezando-se a reatância e resistência do rotor, pois é considerado que o gerador continue com a velocidade do rotor próxima à velocidade síncrona da rede. O máximo valor de corrente do segundo chaveamento é dado por:

$$I_{2max}(R_{se}) = \left\| K(R_1, X') \frac{R_{se} \bar{I}_{1reg}}{jX' + R_1} + \sqrt{2} \bar{I}_{1reg} \right\| \quad (8)$$

Sendo:

$I_{2max}(R_{se})$  = valor da máxima corrente de energização do segundo chaveamento em função da resistência série;

$K(R_1, X')$  = fator de multiplicação para obtenção do valor de pico da corrente, calculado por (5) utilizando  $R_1$  e  $X'$ .

É interessante notar que, para a construção da curva de corrente do segundo chaveamento pode-se calcular o fator  $K$  apenas uma vez, visto que ele não depende da resistência série.

## V. RESULTADOS DE VALIDAÇÃO

Nesta seção, os resultados provenientes de simulações são comparados com os resultados analíticos com o objetivo de validar a formulação analítica apresentada. O resistor ótimo e a máxima corrente de energização são obtidos analiticamente através dos seguintes passos:

- Calcular a reatância subtransitória,  $X'$ , através de (4);
- Calcular  $K(R_1, X')$  usando (5);
- Para cada valor de resistor série ( $R_{se}$ ):
  - Calcular  $K(R_{se} + R_1, X')$  usando (5);
  - Calcular  $I_{1max}(R_{se})$ , usando (6);
  - Calcular a corrente  $\bar{I}_{1reg}$ , usando (7);
  - Calcular  $I_{2max}(R_{se})$  com  $K(R_1, X')$  usando (8);
- Traçar as curvas de  $I_{1max}(R_{se})$  e  $I_{2max}(R_{se})$  versus  $R_{se}$ ;

- Obter os valores de  $I_{max}$  e  $R_{se}$  na intersecção das curvas.

Inicia-se o procedimento com  $R_{se}=0$  (sem resistor) e vai-se aumentando o valor da resistência passo a passo com incremento determinado, por exemplo,  $0,1 \Omega$  até encontrar-se o ponto de intersecção. O método pode ser facilmente automatizado, fornecendo diretamente o ponto ótimo.

O resultado da aplicação das fórmulas analíticas para a máquina de 2MVA é comparado com os resultados de simulações eletromagnéticas na Fig. 9. Nas simulações a máquina é conectada a uma subestação com potência de curto-circuito infinita através de resistores série e foi controlada de forma a manter a velocidade do rotor constante e igual à velocidade síncrona da rede.

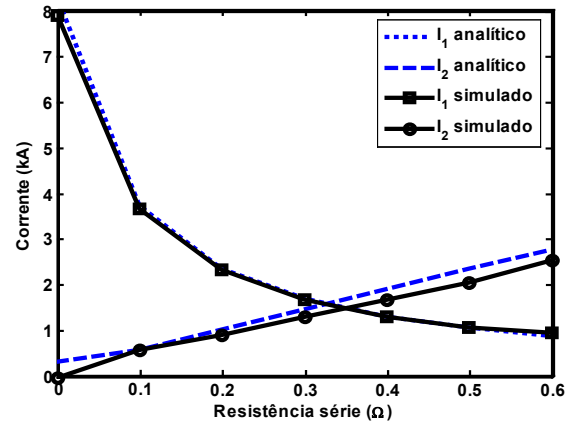


Fig. 9. Curvas de corrente analítico x simulação - máquina de 2MVA.

A intersecção das curvas por simulação ocorre no ponto  $(0,35\Omega; 1,5\text{kA})$ , enquanto que a intersecção das curvas obtidas analiticamente ocorre no ponto  $(0,33\Omega; 1,56\text{kA})$ .

A metodologia é testada também utilizando uma máquina de 670 KVA com tensão nominal de 0,690 kV, cujos dados apresentam-se no Apêndice (Máquina 2). A máquina é conectada através de resistores em série a uma fonte de tensão de 0,690 kV.

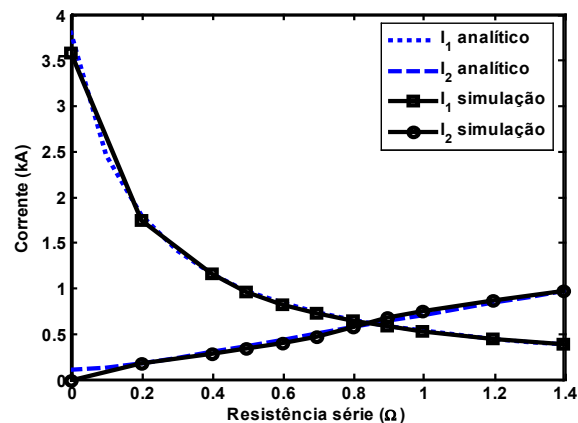


Fig. 10. Curvas de corrente analítico x simulação - máquina de 670KVA.

A intersecção das curvas obtidas por simulação foi no ponto  $(0,844\Omega; 0,622 \text{ kA})$ , sendo que a intersecção das curvas obtidas analiticamente foi no ponto  $(0,860 \Omega; 0,618 \text{ kA})$ .

Tendo como base a comparação dos resultados analíticos com os resultados obtidos por simulações eletromagnéticas, o

método analítico apresentou resultados altamente satisfatórios.

## VI. DIMENSIONAMENTO DO RESISTOR

O dimensionamento da energia que o resistor deverá ser capaz de suportar é apresentado em [9]. Sendo dada por:

$$W = P.t = R_{se} \left\| \bar{I}(R_{se}) \right\|^2 t \quad (9)$$

Para este cálculo é considerado que o resistor ficará conectado no máximo 5 segundos. No entanto, a corrente atinge seu valor nominal quando a máquina é energizada com velocidade próxima à velocidade síncrona no máximo em 2 s, quando o resistor pode ser retirado de operação. A corrente utilizada para o cálculo de energia deve ser a corrente eficaz dos primeiros instantes após a energização, dada por:

$$\left\| \bar{I}(R_{se}) \right\| = \frac{\left\| \bar{V} \right\|}{\sqrt{X'^2 + (R_{se} + R_1)^2}} \quad (10)$$

Este cálculo de energia dissipada no resistor é aproximado, porém bastante conservador.

## VII. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentadas expressões analíticas para obtenção do valor de resistor ótimo, o qual deve ser usado em série com o gerador durante sua energização, e retirado de operação após a corrente atingir o valor de regime.

Os resultados das fórmulas analíticas mostraram-se confiáveis, à medida que foram confrontados com resultados de simulações. A principal vantagem da utilização do método analítico consiste em evitar o uso de repetidas simulações. No entanto, sugere-se que uma vez obtido o resultado através das fórmulas analíticas, a energização do gerador seja simulada com o valor de resistor encontrado, para observação detalhada do comportamento dinâmico da corrente e das restrições causadas por afundamentos de tensão na rede.

O método pode ser estendido para considerar a impedância do sistema e a impedância da fonte, além dos capacitores de compensação de potência reativa da rede.

## VIII. APÊNDICE – DADOS DAS MÁQUINAS E SISTEMA

• Máquina 1	• Máquina 2
S = 2 MVA	S = 0,670 MVA
V = 0,69 kV	V = 0,69 kV
R <sub>s</sub> = 0,0175 pu	R <sub>s</sub> = 0,0118 pu
L <sub>s</sub> = 0,2571 pu	L <sub>s</sub> = 0,217 pu
R <sub>r</sub> = 0,019 pu	R <sub>r</sub> = 0,0156 pu
L <sub>r</sub> = 0,295 pu	L <sub>r</sub> = 0,186 pu
L <sub>m</sub> = 6,921 pu	L <sub>m</sub> = 7,28 pu
H = 1,99 s	H = 1,9 s
f = 60 Hz	f = 60 Hz
P = 2	P = 2

• Dados da linha:

$$R_L = 0,0825 \Omega \quad X_L = 0,1037 \Omega$$

• Parâmetros da subestação:

$$S(\text{curto-circuito}) = 1500\text{MVA} \quad \text{Relação } X/R = 10$$

## IX. REFERÊNCIAS

- [1] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac, *Embedded Generation*, 1st ed. Institute of Electrical Engineers, 2000.
- [2] Working Group 37.23, "Impact of Increasing Contribution of Dispersed Generation on the Power System," CIGRÉ, Relatório Técnico, 1999.
- [3] Working Group 4, "Dispersed Generation," CIREN, Relatório Técnico, 1999.
- [4] R. Belhomme, M. Plamondon, H. Nakra, D. Desrosiers and C. Cagnon, "Case study on the integration of a non-utility induction generator to the Hydro-Quebec distribution network," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1677-1684, July 1995.
- [5] J. R. Parsons Jr, "Cogeneration application of induction generators," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. 497-503, May/June 1984.
- [6] J. M. Rodriguez, J. L. Fernández, D. Beato, R. Iturbe, J. Usaola, P. Ledesma and J. R. Wilhelm, "Incidence on power system dynamics of high penetration of fixed speed and doubly fed wind energy systems: study of the Spanish case," *IEEE Trans. Power System*, vol. 14, no. 4, pp. 1089-1095, Nov. 2002.
- [7] V. Akhmatov, "Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power," Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, Apr. 2003.
- [8] T. J. Hammons, S. C. Lai Glasgow, "Voltage Dips Due to Direct Connection of Induction Generators in Low Head Hydro Electric Schemes," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 9, pp. 460-465, Sep. 1994.
- [9] T. Thiringer, "Grid-Friendly Connecting of Constant-Speed Wind Turbines Using External Resistors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 17, pp. 537-542, Dec. 2002.
- [10] Gómez, S. A; Amenedo, J. L; "Grid Synchronisation of Doubly Fed Induction Generators Using Direct Torque Control," *IEEE 28<sup>th</sup> Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, vol.4, Nov. 2002.
- [11] A. G. G. Rodrigues, M. B. Payán and C. I. Mitchell, "PSCAD based simulation of the connection of a wind generator to the network", in *IEEE Power Tech Conference*, Sep. 2001.
- [12] Fitzgerald A. E; Kingsley, C. Jr; Kusko, A; "Máquinas Elétricas," *McGraw-Hill*, 1971.
- [13] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE Standard 171-1993, Dec. 1993.
- [14] A. J. Rodolakis, "A Comparison of North American (ANSI) and European (IEC) Fault Calculation Guidelines," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 29, pp. 515-521, May/Jun. 1993.
- [15] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [16] A. Sharghi, "Single Resistor Methods of Reducing Induction Generator Inrush Current," M.Sc. dissertation, Dept. of Elec. And Comp. Eng., Univ. of Alberta, 2005.

## X. BIOGRAFIAS

**Ahda Pionkoski Grilo** Formada em Engenharia Elétrica pela UNIOESTE, possui mestrado em Engenharia Elétrica pela UNICAMP. Atualmente é estudante de doutorado em Engenharia Elétrica também pela UNICAMP. Suas áreas de interesse abrangem operação de sistemas elétricos de potência, estabilidade de sistemas de potência e geração distribuída.

**Walmir Freitas** Doutor em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em 2001. De 2002 a 2003 realizou o pós-doutorado na Universidade de Alberta, Edmonton, Canadá. Atualmente é professor na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Suas áreas de interesse abrangem análise de sistemas de distribuição e geração distribuída.

**Carlos Alberto Favarin Murari** Doutor em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em 1986. Professor da UNICAMP desde 1976. Suas áreas de interesse consistem em controle de sistemas de potência, controle fuzzy em sistemas de transmissão, distribuição e planejamento da distribuição.

**André Luiz Morelato França** Doutor em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em 1982. Professor da FEEC/UNICAMP de 1981 até 2003, quando se aposentou. Atualmente é Professor Colaborador na mesma instituição. Suas áreas de interesse são estabilidade transitória, controle e automação de sistemas elétricos de potência.