



EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Guilherme Gomes dos Santos^{*12}, Paulo Sérgio Zanin Júnior¹²

¹UFG – Universidade Federal de Goiás

²ENEL – Enel Distribuição Goiás

Resumo – Quando ocorre um curto-circuito em máquinas síncronas, correntes são induzidas no enrolamento de forma a compensar os fluxos concatenados, surgindo assim parâmetros visíveis no oscilograma. Este trabalho permite verificar os parâmetros da máquina síncrona e analisar seu comportamento no distúrbio por meio de modelagem computacional, a qual utiliza o conceito das equações de Park, reatâncias operacionais e constantes de tempo. Apresenta-se um estudo de caso e comparação dos resultados obtidos com parâmetros de uma máquina real.

Palavras-Chave - curto-circuito; máquina síncrona; reatância; extração de parâmetros.

SYNCHRONOUS MACHINES PARAMETERS EXTRACTION BY SHORT- CIRCUIT COMPUTATIONAL SIMULATION

Abstract – When a short circuit occurs in synchronous machines, currents are induced in the winding in order to compensate the concatenated flux, thus resulting in visible parameters in oscillogram. This work allows synchronous machine parameters verification and its behavior analysis during a disturb by computational modeling, using the following concepts: Park equations, operational reactances and time constants. It is presented a study case and the comparison between obtained results and real machine parameters.

Keywords – short circuit; synchronous machine; reactance; parameter extraction.

NOMENCLATURA

- P Número de par de pólos.
 V_{qd} Componentes da tensão de estator.
 I_{qd} Componentes da corrente de estator.
 v_{qs}^r Tensão do eixo de quadratura no referencial do rotor.
 v_{ds}^r Tensão do eixo de direto no referencial do rotor.

ψ_{qs}^r Fluxo concatenado em eixo quadratura no referencial do rotor.

ψ_{ds}^r Fluxo concatenado em eixo direto no referencial do rotor.

i_{ds}^r Corrente do estator no eixo direto no referencial do rotor.

i_{qs}^r Corrente do estator no eixo de quadratura no referencial do rotor.

v_{fd}^r Derivada da Tensão do eixo magnético direto.

v_{kq2}^r Derivada da Tensão do eixo magnético quadratura.

ω_r Velocidade angular do rotor.

ω_b Velocidade angular de base elétrica.

p Derivada no tempo.

$X_q(s)$ Impedância operacional do eixo q.

$X_d(s)$ Impedância operacional do eixo d.

X_{md} Impedância de magnetização de eixo direto.

X_{mq} Reatância de magnetização de eixo de quadratura.

X_{ls} Reatância de dispersão.

I. INTRODUÇÃO

A máquina síncrona trifásica é aquela na qual uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura e um fluxo de corrente contínua (CC) de rotor é produzido por uma excitação CC no enrolamento do campo ou por ímãs [1]. Ela é constituída basicamente de 3 enrolamentos, cujos eixos magnéticos estão defasados de 120° elétricos ao longo do perímetro do entreferro, definindo o estator. Internamente, há um enrolamento em torno de um núcleo de ferro alimentado por corrente contínua que produz um fluxo magnético estático, definindo o rotor, também chamado de enrolamento de campo ou de excitação [2]. É uma máquina em corrente alternada, no qual seu campo girante está em sincronismo com o rotor. Esse

*guilherme.santos1@enel.com

tipo de máquina é usado principalmente para converter energia mecânica em elétrica.

O comportamento elétrico e eletromecânico da maioria das máquinas síncronas pode ser conhecido a partir das equações que descrevem o síncrono trifásico de pólos salientes. Em particular, essas equações são utilizadas para avaliar o desempenho de motores síncronos, híbridos, vapor, combustão ou síncronos acionados por turbinas eólicas geradores [3].

Quando ocorre um curto-circuito na máquina síncrona, correntes são induzidas no enrolamento de campo e no enrolamento amortecedor de forma a compensar os fluxos concatenados, mantendo-os constantes [2]. Com o curto-circuito, é possível analisar as correntes de estator por meio das equações de Park e, conseqüentemente, determinar os parâmetros da máquina e seu comportamento diante do distúrbio.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De modo a facilitar a análise de curto-circuito trifásico na máquina síncrona, utilizam-se os conceitos de Park, seu conjunto de equações, conceitos de constantes de tempo e reatâncias operacionais. Estes, portanto, serão os temas apresentados na fundamentação teórica.

A. Equações de Park

Em 1929, Park desenvolveu a transformação de coordenadas dq0, onde as fases a, b e c, defasadas de 120°, giram em sincronismo numa velocidade em relação ao referencial d e q, que é composto de 2 enrolamentos teoricamente estacionários e em quadratura [2].

Em seu trabalho, Park adota impedâncias operacionais e uma função de transferência entre fluxo de estator e tensão de campo. Dessa forma, o rotor é tratado como um modelo de parâmetros distribuídos visto pelo estator [2]. Park utiliza como eixo de referência o rotor, eliminando assim as indutâncias variáveis no tempo das equações de tensão. As equações de Park são apresentadas em (1) a (14).

$$v_{qs}^r = -r_s i_{qs}^r + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}^r \quad (1)$$

$$v_{ds}^r = -r_s i_{ds}^r - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds}^r \quad (2)$$

$$v_{0s} = -r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (3)$$

$$v_{kq1}^r = r_{kq1}' i_{kq1}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq1}^r \quad (4)$$

$$v_{kq2}^r = r_{kq2}' i_{kq2}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq2}^r \quad (5)$$

$$v_{fd}^r = r_{fd}' i_{fd}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{fd}^r \quad (6)$$

$$v_{kd}^r = r_{kd}' i_{kd}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kd}^r \quad (7)$$

$$\psi_{qs}^r = -X_{ls} i_{qs}^r + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^r + i_{kq2}^r) \quad (8)$$

$$\psi_{ds}^r = -X_{ls} i_{ds}^r + X_{mq} (-i_{ds}^r + i_{fd}^r + i_{kd}^r) \quad (9)$$

$$\psi_{0s} = -X_{ls} i_{0s} \quad (10)$$

$$\psi_{kq1}^r = X_{lkq1}' i_{kq1}^r + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^r + i_{kq2}^r) \quad (11)$$

$$\psi_{kq2}^r = X_{lkq2}' i_{kq2}^r + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^r + i_{kq2}^r) \quad (12)$$

$$\psi_{fd}^r = X_{lfd}' i_{fd}^r + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^r + i_{kd}^r) \quad (13)$$

$$\psi_{kd}^r = X_{lkd}' i_{kd}^r + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^r + i_{kd}^r) \quad (14)$$

Nas equações (15) a (20), utilizam-se reatâncias operacionais e uma função de transferência entre fluxo de estator e tensão de campo [3], sendo que o operador p é a derivada no domínio da frequência e s , o operador de Laplace.

$$v_{qs}^r(s) = -r_s i_{qs}^r(s) + \frac{\omega_r(s)}{\omega_b} \psi_{ds}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{qs}^r(s) \quad (15)$$

$$v_{ds}^r(s) = -r_s i_{ds}^r(s) - \frac{\omega_r(s)}{\omega_b} \psi_{qs}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{ds}^r(s) \quad (16)$$

$$v_{0s}^r(s) = -r_s i_{0s}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{0s}^r(s) \quad (17)$$

$$\psi_{qs}^r(s) = X_q(s) i_{qs}^r(s) \quad (18)$$

$$\psi_{ds}^r(s) = X_d(s) i_{ds}^r(s) + G(s) v_{fd}^r \quad (19)$$

$$\psi_{0s}^r(s) = X_{ls} i_{0s}^r \quad (20)$$

As equações de Park desprezam as características magnéticas do material resultando em um circuito magnético linear, não considerando a saturação. Portanto, se houver saturação, não é possível fazer este tipo de análise com as equações de Park. Além disso, as equações eliminam a quantidade de enrolamentos amortecedores de rotor.

B. Reatâncias de Máquina Síncrona

Utilizando os circuitos de eixo direto e de quadratura, é possível encontrar as reatâncias da máquina síncrona. Através da metodologia empregada [3], considerando uma máquina com um enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor no eixo d e dois enrolamentos amortecedores no eixo q , têm-se os circuitos representados nas Figuras de 1 e 3.

Na Figura 1, ilustra-se em forma de circuito do eixo q de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_q(s)$. Na Figura 2, é exibido em forma de circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_d(s)$, com $f_{fd}^r = 0$. Na Figura 3, tem-se a representação em forma de circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a função de transferência $G(s)$, com $i_{ds}^r = 0$.

Na Figura 4, ilustra-se a máquina síncrona com eixos e enrolamentos, sendo, as três fases do estator as , bs e cs , os enrolamentos do rotor de campo f_d e amortecedor k_d no eixo direto e amortecedores k_{q1} e k_{q2} no eixo de quadratura.

Através das equações (15) e (16), é possível encontrar as expressões analíticas para $X_d(s)$, $X_q(s)$ e $G(s)$, apresentadas nas equações (21), (22) e (23). Nestas equações os valores das constantes de tempo τ_1 , τ_2 , etc. relacionam os componentes do seu respectivo circuito [3].

Figura 1: Circuito do eixo q de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_q(s)$

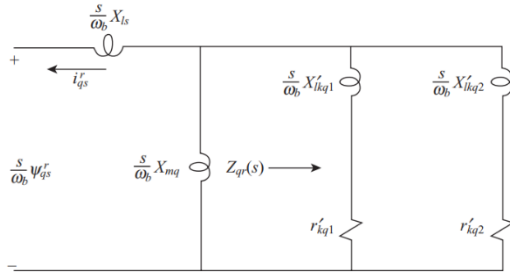


Figura 2: Circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_d(s)$

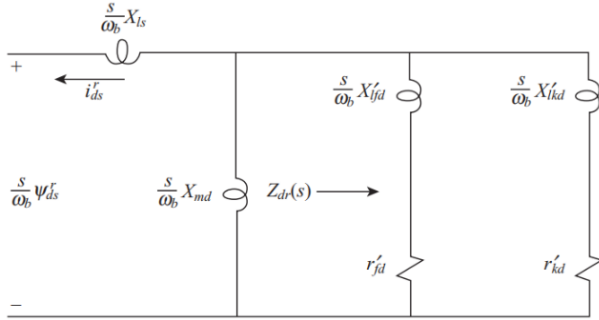


Figura 3: Circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a função de transferência $G(s)$

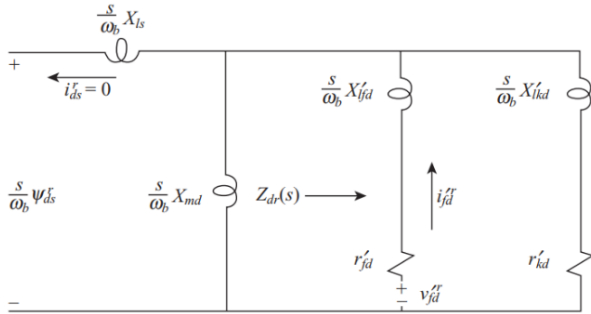
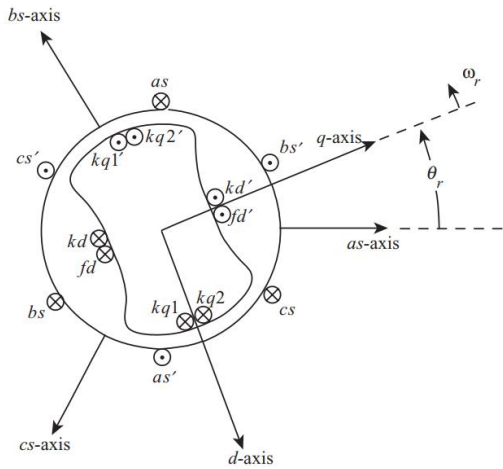


Figura 4: Esquema da máquina síncrona com os eixos e enrolamentos



$$X_q(s) = X_q \frac{1 + (\tau_{q4} + \tau_{q5})s + \tau_{q4}\tau_{q6}s^2}{1 + (\tau_{q1} + \tau_{q2})s + \tau_{q1}\tau_{q3}s^2} \quad (21)$$

$$X_d(s) = X_d \frac{1 + (\tau_{d4} + \tau_{d5})s + \tau_{d4}\tau_{d6}s^2}{1 + (\tau_{d1} + \tau_{d2})s + \tau_{d1}\tau_{d3}s^2} \quad (22)$$

$$G(s) = \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \frac{1 + \tau_{db}s}{1 + (\tau_{d1} + \tau_{d2})s + \tau_{d1}\tau_{d3}s^2} \quad (23)$$

As reatâncias são definidas de acordo com a frequência s em:

- Subtransitórias, X''_d e X''_q , em altas frequências;
- Transitórias, X'_d e X'_q , em médias frequências; e
- Regime permanente, X_d e X_q , em baixas frequências.

Definem-se as reatâncias operacionais por um valor padrão para cada tipo de máquina, as quais se tratam de uma simplificação das formas derivadas do circuito da máquina e estimativa do valor real, sendo este preciso ou não.

C. Constantes de Tempo

As constantes de tempo da máquina síncrona possuem forma derivada das equações de Park e forma padrão. A forma padrão é uma simplificação da forma derivada, sendo uma estimativa do valor real.

Assim como as reatâncias, as constantes de tempo também têm sua classificação. As constantes de tempo são definidas de acordo com a frequência s em:

- Subtransitórias, com τ''_{d0} , τ''_{q0} , τ''_d e τ''_q ; e
- Transitórias, com τ'_{d0} , τ'_{q0} , τ'_d e τ'_q .

Obtêm-se as constantes de tempo a partir das equações de cálculo das impedâncias operacionais, (21), (22) e (23). O denominador destas equações representa a resposta natural do circuito, ou seja, a máquina operando em circuito aberto. Portanto, as constantes de tempo de circuito aberto, τ''_{d0} , τ''_{q0} , τ'_{d0} e τ'_{q0} , são as raízes da equação de segundo grau do denominador da respectiva reatância operacional.

As constantes de tempo de curto-circuito, τ''_d , τ''_q , τ'_d e τ'_q , também são calculadas a partir de (21), (22) e (23), sendo as raízes do numerador destas equações e representam a resposta forçada do sistema, que neste caso é um curto-circuito trifásico das fases do estator.

Encontra-se em [3], as equações das constantes de tempo aqui citadas. Em (24) a (31), tem-se as equações.

$$\tau'_{q0} = \frac{1}{\omega_b r'_{kq1}} (X'_{lkq1} + X_{mq}) \quad (24)$$

$$\tau'_{d0} = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md}) \quad (25)$$

$$\tau''_{q0} = \frac{1}{\omega_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X'_{lkq1}}{X_{mq} + X'_{lkq1}} \right) \quad (26)$$

$$\tau''_{do} = \frac{1}{w_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X'_{lfd}}{X_{md} + X'_{lfd}} \right) \quad (27)$$

$$\tau'_q = \frac{1}{w_b r'_{kq1}} \left(X'_{lkq1} + \frac{X_{mq} X_{ls}}{X_{mq} + X_{ls}} \right) \quad (28)$$

$$\tau'_d = \frac{1}{w_b r'_{fd}} \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \quad (29)$$

$$\tau''_q = \frac{1}{w_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X_{ls} X'_{lkq1}}{X_{mq} X_{ls} + X_{mq} X'_{lkq1} + X_{ls} X'_{lkq1}} \right) \quad (30)$$

$$\tau''_d = \frac{1}{w_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{mq} X_{ls} X'_{lfd}}{X_{md} X_{ls} + X_{md} X'_{lfd} + X_{ls} X'_{lfd}} \right) \quad (31)$$

Quando $r'_{kq2} \gg r'_{kq1}$ e $r'_{kd} \gg r'_{fd}$, as estimativas para os valores padrão das constantes de tempo são mais próximas dos valores calculados a partir das reatâncias operacionais. Geralmente r'_{kd} é bem maior que r'_{fd} , gerando boas estimativas com os valores padrão para o eixo d . Mas r'_{kq2} é quase sempre menor que r'_{kq1} , o que torna as estimativas dos valores padrão não tão adequadas para o eixo q . Nas formas padrão, os termos com r'_{kq1} e com r'_{fd} são eliminados, conforme [3].

III. CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO

Curto-circuito trifásico é o tipo de falta mais severa, ocasionando em uma corrente de falta elevada. É raro acontecer curto-circuito trifásico numa situação real com a máquina sem carga. Entretanto, para fins de estudos, considera-se um ensaio de curto-circuito trifásico sem carga. Através do ensaio é possível obter parâmetros de eixo d da máquina síncrona. Este ensaio é feito com a máquina já na velocidade síncrona, sem carga e com tensão de campo fixa. Em um determinado instante aplica-se um curto-circuito trifásico nas fases do estator da máquina [5].

A. Definição e Expressão Analítica

Para a análise do ensaio de curto-circuito trifásico da máquina síncrona sem carga, utiliza-se as equações de Park. Considerando $G(s = \infty)$ zero, pois o rotor é insensível a altas frequências (intervalo transitório), a variação da tensão de campo é nula e que os termos que aparecerão com r_s^2 serão muito pequenos, estes são desconsiderados. As equações das correntes de eixo q e d são apresentadas em (32), (33), e (34).

$$i''_{qs}(s) = -\frac{1/X_q(s)}{s^2 + 2\alpha s + \omega_b^2} \left[\frac{\omega_b^2 r'_s v'_{qs}(s)}{X_d(s)} + \omega_b s v'_{qs}(s) - \omega_b^2 v'_{ds}(s) \right] \quad (32)$$

$$i''_{ds}(s) = -\frac{1/X_d(s)}{s^2 + 2\alpha s + \omega_b^2} \left[\frac{\omega_b^2 r'_s v'_{ds}(s)}{X_d(s)} + \omega_b s v'_{ds}(s) - \omega_b^2 v'_{qs}(s) \right] \quad (33)$$

$$\alpha = \frac{\omega_b r'_s}{2} \left(\frac{1}{X_q(s)} + \frac{1}{X_d(s)} \right) \quad (34)$$

Para encontrar a corrente de curto-circuito é necessário manipular e resolver as equações (32), (33), e (34) no domínio do tempo. A corrente de curto-circuito é apresentada em (35), após seguir os passos de resolução de [3]. Os passos para esta resolução são:

- Tensão de eixo direto na falta como um degrau de $V_s \sqrt{2}$ para zero, sendo V_s o módulo da tensão nominal;
- $X_d(s)$ e $X_q(s)$ como função das constantes de tempo de circuito aberto e de curto-circuito;
- Fator alfa calculado com $X_s(s = \infty)$; e
- $X_q(s = \infty)$ e os termos com r'_s (com exceção de alfa) são eliminados.

Na equação da corrente do estator (35), tem-se uma componente AC com a mesma frequência do sistema, uma componente DC que decresce de forma exponencial e outra componente AC que decresce de forma exponencial com o dobro da frequência do sistema.

$$i_{as} = \sqrt{2} V_s \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau'_d} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau''_d} \right] \sin[\omega_b t + \theta_r(0)] - \frac{\sqrt{2} V_s}{2} \left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\alpha t} \sin \theta_r(0) - \frac{\sqrt{2} V_s}{2} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\alpha t} \sin[2\omega_b t + \theta_r(0)] \quad (35)$$

B. Intervalos Subtransitório, Transitório e Regime Permanente no Curto-Circuito

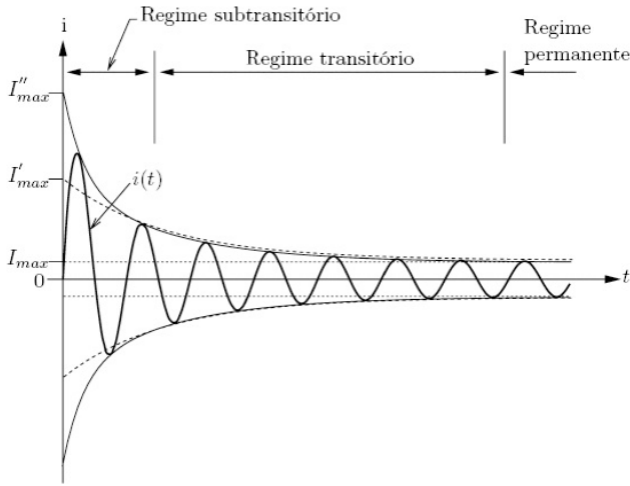
Na ocorrência de curto-circuito na máquina síncrona, os fluxos concatenados nos circuitos fechados do rotor não podem variar instantaneamente. Dessa forma, correntes são induzidas no enrolamento de campo e no enrolamento amortecedor de forma a compensar os fluxos concatenados, mantendo-os constantes [2].

Após o curto-circuito é possível notar variações na corrente da máquina síncrona. Na Figura 5, tem-se um exemplo do comportamento desta corrente, sendo dividida em três intervalos: subtransitório, transitório e regime permanente.

O intervalo subtransitório refere-se aos primeiros ciclos do curto-circuito contém correntes de armadura muito elevadas que se amortecem rapidamente, com relação às altas variações de corrente nos enrolamentos amortecedores. No intervalo transitório a corrente amortecida vai a zero e a corrente de campo ainda é alta, porém menor que no intervalo subtransitório.

O regime permanente é alcançado quando não há mais variação de fluxo nos enrolamentos amortecedores e de campo.

Figura 5: Exemplo de corrente em curto-circuito trifásico em uma máquina síncrona.



Neste intervalo não há corrente induzida, pois a máquina alcança o equilíbrio. Em regime permanente, o campo magnético resultante do estator gira na mesma velocidade que o campo induzido pelo rotor. Assim, não há variação temporal dos enlaces de fluxo nos circuitos do rotor e nenhuma tensão é induzida ali.

A reatância subtransitória é a menor de todas, seguida da reatância transitória e reatância em regime permanente, a maior delas. Dessa maneira, a relação entre as reatâncias de eixo direto é expressa da seguinte forma: $X''_d < X'_d < X_d$.

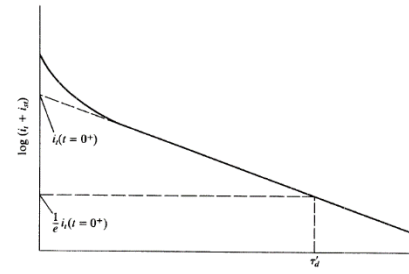
IV. EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS

Em [3], [5] e [6], utiliza-se o método do oscilograma da corrente de curto-circuito para obtenção dos parâmetros de eixo d da máquina síncrona, através do ensaio de curto-circuito. Para facilitar, utiliza-se a escala logarítmica, a qual transforma as envoltórias em retas, e portanto, a forma logarítmica é mais prática para extração dos parâmetros, como mostra a Figura 6. O gráfico ilustra os componentes transitórios e subtransitórios da corrente de curto-circuito do estator. Nesse oscilograma logarítmico não é plotada a corrente de regime permanente, logo não decai com o tempo.

Com a equação (36) é possível encontrar X_d a partir da corrente final, sendo $i_{sc}(t \rightarrow \infty)$ o valor da corrente após alguns segundos, já estabilizando. A corrente final é dividida em três partes, conforme a expressão (37). Logo, em regime permanente tem-se i_{ss} (*steady-state*, regime permanente), como parte que decai com τ'_d tem-se i_t (corrente transitória) e como parte que decai com τ''_d tem-se i_{st} (corrente subtransitória).

A Figura 6 é a plotagem logarítmica de $i_t + i_{st}$ (Intervalo transitório e subtransitório), por meio do qual é possível extrair o valor da corrente nos instantes iniciais da falta, $i_t(t = 0^+)$. Assim, calcula-se a razão entre as constantes de tempo de curto-circuito e circuito aberto, apresentada pela equação (38).

Figura 6: Curva logarítmica da forma de onda da corrente



$$i_{sc}(t \rightarrow \infty) = \frac{\sqrt{2}V_s}{X_d} \quad (36)$$

$$i_{sc} = i_{ss} + i_t + i_{st} \quad (37)$$

$$i_t(t = 0^+) = \sqrt{2}V_s \left(\frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (38)$$

Pode-se substituir $(\tau'_{do}/\tau'_d) * (1/X'_d)$ por $1/X''_d$. Mesmo sem as constantes de tempo padrão, τ'_{do} pode ser calculado com parâmetros conhecidos da máquina [3]. As referências [5] e [6] assumem as constantes padrão para este cálculo.

Além disso, encontra-se a constante de tempo τ'_d , sendo o tempo em que a corrente se torna $i_t(t = 0^+)/e$. Subtraindo o valor máximo de $i_t + i_{st}$ por $i_t(t = 0^+)$, obtém-se $i_{st}(t = 0^+)$. Com este resultado é possível traçar a curva da diferença e encontrar τ''_d da mesma forma que foi encontrado τ'_d . Pela equação (39), encontra-se X''_d .

$$i_{sc}(t = 0^+) = \frac{\sqrt{2}V_s}{X''_d} \quad (39)$$

Com os equacionamentos, determina-se os parâmetros de eixo d da máquina síncrona: X_d , X'_d e X''_d . Com esses parâmetros encontrados através do ensaio de curto-circuito, é possível obter os parâmetros da máquina síncrona. A aproximação para constantes de tempo padrão, para encontrar X''_d por exemplo, é realizada para simplificar os cálculos.

V. ESTUDO DE CASO

Para aplicar os conceitos apresentados, elaborou-se um exemplo da extração de parâmetros de eixos d . Com os parâmetros reais da máquina, plotou-se gráficos da corrente de curto-circuito do estator. A partir dos gráficos, extraiu-se os parâmetros da máquina e estes foram comparados com os valores reais. Esse método permite verificar a aplicabilidade as equações de Park no ensaio de curto-circuito. Utilizou-se máquinas de 100 MVA e com tensão de 23 kV [2].

As Figuras 7, 8 e 9, ilustram o transitório dessas máquinas, plotados pelas equações de Park solucionadas no programa.

Na figura 7, tem-se o gráfico da corrente de curto-circuito em uma máquina síncrona, gerando uma corrente muito maior que a corrente nominal. Isso mostra a importância de uma proteção eficaz na máquina.

No gráfico da Figura 8, tem-se o oscilograma da corrente de curto-circuito em uma máquina síncrona sem a componente contínua e sem a componente com dobro da frequência. Nota-se que a corrente tende a se estabilizar mais rápido neste caso.

Com a equação (36) é possível calcular X_d , sendo $i_{sc}(t \rightarrow \infty)$ igual a 1,458 p.u., de acordo com a figura 8. Através da equação (39), é possível encontrar X_d'' , sendo $i_{sc}(t = 0^+)$ igual a 7,071 p.u. Utilizando-as, encontra-se $X_d = 1$ p.u. e $X_d'' = 0.2$ p.u., seguindo a referência [4]. Ambas as reatâncias encontradas são iguais às reatâncias reais da máquina. Para encontrar os demais parâmetros é preciso traçar a curva logarítmica e remover a parte de regime permanente.

Figura 7: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, a vazio

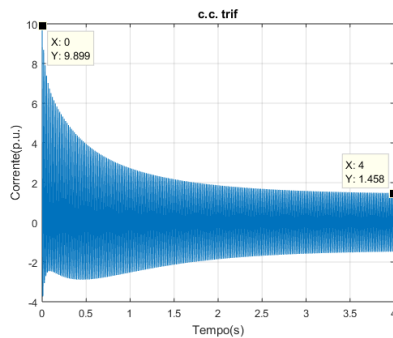


Figura 8: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, sem componente contínua e sem componente com dobro da frequência

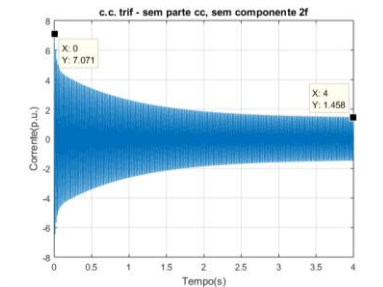
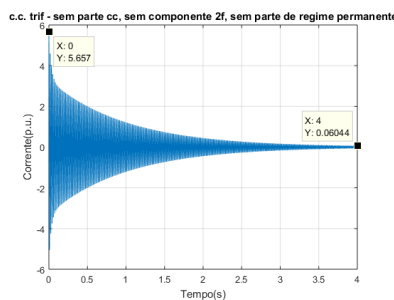


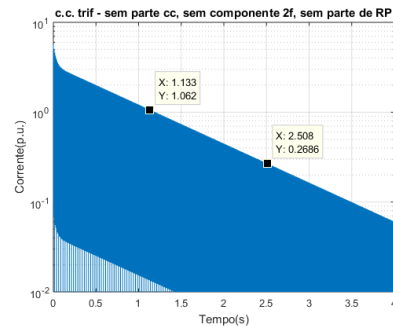
Figura 9: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, sem componente contínua, sem componente com dobro da frequência e sem componente de regime permanente



A constante de tempo então pode ser calculada utilizando o ponto $i_i(t = 0^+)/e$, conforme Figura 6. Através deste valor, utilizando o gráfico da Figura 10, é possível encontrar τ_d' . Encontra-se que τ_d' é igual a 1 s. Com os valores da corrente transitória e subtransitória, é possível encontrar o valor de corrente subtransitória no instante zero, sendo que $i_i(t = 0^+)$ já é um valor conhecido. Com a mesma lógica para encontrar a

constante de tempo transitória, encontra-se τ_d'' , sendo igual a 0.03 s. Ambos os valores são iguais aos valores reais da máquina.

Figura 10: Gráfico em escala logarítmica



VI. CONCLUSÕES

Este trabalho exibiu a importância do ensaio de curto-circuito – que mostra o comportamento da máquina com mudanças bruscas de carga – para determinar os parâmetros de eixo d da máquina síncrona: reatâncias operacionais e constantes de tempo.

Nota-se que o modelo computacional desenvolvido a partir das equações de Park, permite encontrar os parâmetros da máquina síncrona (constantes de tempo e reatâncias) de maneira precisa para o esforço computacional gasto, que é bastante pequeno, com exceção da reatância de eixo direto transitória.

Nota-se nos resultados a importância de proteção no equipamento, para que este possa funcionar de maneira contínua e oferecendo o melhor desempenho, a fim de evitar danos a máquina síncrona na ocorrência de curto-circuito nos terminais do estator.

Sugere-se como futuros trabalhos, a melhoria na extração de parâmetros, com uso de inteligência artificial para extrair os parâmetros de maneira mais eficiente e a simulação do comportamento das equações de Park com saturação para verificar sua inadequabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, Máquinas Elétricas, 6ª edição, Bookman.
- [2] T. Granato, “Análise de curto circuito em um gerador síncrono de pólos salientes pelo método dos elementos finitos,” UFRJ, Agosto 2013.
- [3] P. C. Krause. Analysis of electric machinery and drive systems. Wiley, IEEE.
- [4] R. H. Park., Two reaction theory of synchronous machines – Generalized method of analysis - part I. AIEE – Transactions, Vol. 48, Julho de 1929, pp. 716-727.
- [5] L. W. Matsch, J. D. Morgan. Electromagnetic and electromagnetic machines. 3rd Edition, Wiley. New York, 1987.
- [6] L. T. Jordão. Máquinas síncronas. LTC/EDUSP. São Paulo, 1980.