

NEUTRO À TERRA

Revista Técnico-Científica [Nº9] Junho de 2012

<http://www.neutroaterra.blogspot.com>

A revista “Neutro à Terra” volta novamente à vossa presença, com novos e interessantes assuntos na área da Engenharia Eletrotécnica em que nos propomos intervir. Nesta edição da revista merecem particular destaque os temas relacionados com as instalações elétricas, as máquinas elétricas, a eficiência energética e as energias renováveis.

Nesta publicação dá-se também destaque à quarta edição das Jornadas Eletrotécnicas de Máquinas e Instalações Elétricas, que devem ocorrer nos dias 5 e 6 de Dezembro de 2012 no Centro de Congressos do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Professor Doutor José Beleza Carvalho



Instalações
Elétricas
Pág.5



Máquinas
Elétricas
Pág. 19



Telecomunicações
Pág. 27



Segurança
Pág. 31



Energias
Renováveis
Pág. 39



Eficiência
Energética
Pág.55



Domótica
Pág. 61

Índice

03| Editorial

05| Instalações Elétricas

Electromagnetic Forces of Short-Circuits
in Symmetric Three-phase Circuits
Rui Manuel de Moraes Sarmento

19| Máquinas Elétricas

Geradores Eólicos Características Elétricas
José António Beleza carvalho
Roque Filipe Mesquita Brandão

27| Telecomunicações

ZAP – Muito mais que um acesso privilegiado
Sérgio Filipe Carvalho Ramos
António Silva

31| Segurança

Segurança Contra Incêndio em Edifícios
Regime Jurídico, Normas e Notas Técnicas
António Augusto Araújo Gomes
Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva

39| Energias Renováveis

Inovar na produção de energia elétrica a partir do vento
O recurso a postes de eletricidade existentes
Miguel Leichenring Franco

Cogeração e Trigeração. Um caso prático
Alfredo Silva
Pedro Costa

55| Eficiência Energética

Veículos Elétricos
Impactos, Barreiras e Oportunidades da Integração nos Sistemas de Energia
Vera Silva

61| Domótica

Servidor de Automação e Automação LEAN
Para uma GTC mais otimizada
Infocontrol – Eletrónica e Automatismo, Lda

65| Autores

FICHA TÉCNICA

DIRETOR:

Doutor José António Beleza Carvalho

SUBDIRETORES:

Eng.º António Augusto Araújo Gomes
Doutor Roque Filipe Mesquita Brandão
Eng.º Sérgio Filipe Carvalho Ramos

PROPRIEDADE:

Área de Máquinas e Instalações Elétricas
Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto

CONTATOS:

jbc@isep.ipp.pt ; aag@isep.ipp.pt

PUBLICAÇÃO SEMESTRAL:

ISSN: 1647-5496

Estimados leitores

A revista “Neutro à Terra” volta novamente à vossa presença, com novos e interessantes assuntos na área da Engenharia Eletrotécnica em que nos propomos intervir. Nesta edição da revista merecem particular destaque os temas relacionados com as instalações elétricas, as máquinas elétricas, a eficiência energética e as energias renováveis.

As forças eletromagnéticas que se manifestam nas situações de curto-circuito são de extrema complexidade, sendo o seu conhecimento determinante para um correto dimensionamento das instalações elétricas, quer ao nível dos esforços que condutores e barramentos ficam sujeitos, quer ao nível do dimensionamento de equipamentos de proteção. Nesta edição, apresenta-se um artigo de elevado nível científico, que descreve uma nova metodologia de cálculo das forças que se estabelecem entre condutores na situação mais desfavorável de um curto-circuito, particularmente no período transitório da ocorrência do defeito. Os resultados obtidos com diversas simulações, que são aqui apresentadas, permitem uma reflexão aberta sobre o que está estabelecido e é atualmente aceite, no âmbito dos valores máximos das forças eletromagnéticas resultantes de um curto-circuito simétrico trifásico.

A produção de eletricidade a partir de energia eólica tem vindo a crescer de forma rápida e sustentada desde 1985. Atualmente, existem geradores eólicos localizados em todo o mundo cuja potência já atinge valores superiores a 3000 MW. A necessária conversão eletromecânica de energia baseia-se em máquinas que apresentam um princípio de funcionamento baseado nas leis da indução eletromagnética, assente no princípio das ações e reações eletromagnéticas, devidamente justificadas pelas leis de Faraday, Lenz e Laplace. Nesta edição, apresenta-se um artigo que analisa as principais características elétricas das máquinas mais utilizadas como geradores eólicos.

A necessidade de reduzir a dependência Europeia dos combustíveis fósseis e de reduzir o nível de emissões de dióxido de carbono oriundos do sector dos transportes deu origem a uma necessidade de desenvolver novas tecnologias e soluções de mobilidade. Uma das soluções que se apresenta como promissora é a substituição de veículos movidos por motores de combustão térmica por veículos elétricos e veículos híbridos recarregáveis. Nesta edição da revista apresenta-se um importante artigo, que analisa o impacto desta nova carga elétrica ao nível do planeamento, gestão e exploração dos atuais sistemas elétricos de energia.

O forte desenvolvimento que se tem verificado na produção de energia elétrica com recurso a fontes de energia renováveis, especialmente de natureza eólica, levou na última década a uma grande proliferação de parques eólicos. Como resultado de pesados investimentos em grandes geradores eólicos, o vento passou de um pequeno fornecedor de energia para um dos principais componentes do mix energético dos países industrializados. A eletricidade gerada a partir do vento aumentou mundialmente a uma taxa média de 21% entre 2006 e 2010, representando hoje cerca de 2% do fornecimento total de energia. Nesta edição da revista, publica-se um artigo que aborda uma forma inovadora de produção de energia eólica, baseado na utilização dos postes das redes de transporte e distribuição de energia elétrica para colocação dos aerogeradores.

Nesta edição da revista “Neutro à Terra” pode-se ainda encontrar outros assuntos reconhecidamente importantes e atuais, como um artigo sobre infraestruturas de telecomunicações em edifícios, um artigo sobre segurança contra incêndios em edifícios e um artigo que analisa as tecnologias adotadas na cogeração e trigeração, apresentando-se um caso prático de cogeração e trigeração em funcionamento num centro comercial da cidade do Porto.

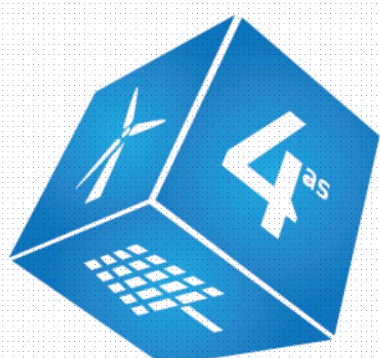
No âmbito do tema “Divulgação”, que pretende divulgar os laboratórios do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, onde são realizados alguns dos trabalhos correspondentes a artigos publicados nesta revista, nesta edição apresenta-se o Laboratório de Sistemas Digitais.

Nesta publicação dá-se também destaque à quarta edição das Jornadas Eletrotécnicas de Máquinas e Instalações Elétricas, que devem ocorrer nos dias 5 e 6 de Dezembro de 2012 no Centro de Congressos do ISEP. Este evento contará com a participação de diversas empresas ligadas às áreas das máquinas elétricas, sistemas eletromecânicos, energias renováveis, veículos elétricos, segurança, domótica, luminotecnia e infraestruturas de telecomunicações. O evento é organizado pelo Departamento de Engenharia Eletrotécnica do ISEP, com os habituais colaboradores desta revista a terem um papel preponderante.

Esperando que esta nova edição da revista “Neutro à Terra” possa voltar a satisfazer as expectativas dos nossos leitores, apresento os meus cordiais cumprimentos.

Porto, Junho de 2012

José António Beleza Carvalho



JORNADAS
ELETROTÉCNICAS
MÁQUINAS E INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

4^{as} JORNADAS ELETROTÉCNICAS DE MÁQUINAS E INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

5 e 6 de Dezembro de 2012

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Informações
www.dee.isep.ipp.pt
jbc@isep.ipp.pt

Objetivo

Promover a divulgação e discussão de temas relacionados com as Máquinas e Instalações Elétricas, devidamente enquadrados com a problemática atual das energias renováveis e a utilização racional de energia, envolvendo o ensino, a investigação, profissionais e empresários do sector eletrotécnico, através da apresentação de comunicações e exposição de equipamentos.

Destinatários

Licenciados, bacharéis, alunos de cursos de Engenharia Eletrotécnica e, de uma forma geral, todos os profissionais do sector eletrotécnico, que exerçam funções relacionadas com as áreas das máquinas e instalações elétricas.

Temas

Investigação/Ensino; Política Energética; Energias Renováveis; Máquinas Elétricas; Veículos Elétricos; Sistemas Eletromecânicos; Instalações Elétricas; Sistemas de Segurança; Telecomunicações.

Forças Eletromagnéticas de Curtos-Circuitos em Circuitos Trifásicos Simétricos

Resumo

Este trabalho descreve uma metodologia de cálculo que pretende apresentar um aperfeiçoamento na obtenção das forças eletromagnéticas entre condutores de um sistema trifásico simétrico, nas situações mais desfavoráveis de curto-circuito, nomeadamente no período subtransitário e na ocorrência da corrente de choque de curto-circuito num dos condutores. Analisa as configurações geométricas mais comuns dos condutores, em esteira ou triângulo. Os programas de cálculo automático foram desenvolvidos com MATLAB que tornou possível a obtenção de resultados de elevada precisão, numa incursão na dualidade espaço-tempo do campo forças. Os resultados permitem abrir uma reflexão no estabelecido e universalmente aceite sobre as máximas forças de curto-circuito.

Palavras-chave

Forças eletromagnéticas, curtos-circuitos, circuitos trifásicos e máxima corrente de defeito, força máxima de C.C., fator de correção, redução de custos.

1. Introdução

A corrente de curto-circuito trifásico simétrico - análise por fase - nos instantes iniciais é obtida a partir do conhecimento da potência de curto-circuito trifásica ou da impedância equivalente do circuito trifásico no ponto de curto-circuito.

$$Z_{eq}'' = \sqrt{R^2 + X''^2}$$

R e X'' são a resistência equivalente e a reactância equivalente subtransitória no ponto de curto-circuito.

A reactância equivalente subtransitória, no ponto de defeito, inclui as reactâncias das fontes para os instantes iniciais do curto-circuito.

A tensão numa fase, no instante inicial,

$$v = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \phi)$$

origina uma corrente instantânea,

$$i = \frac{v(t)}{Z_{eq}''} + i_{continua}$$

i = corrente alternada (simétrica) + componente contínua

$$i = \frac{\sqrt{2} V}{\sqrt{R^2 + X''^2}} \left(\cos(\omega t + \phi - \beta) - \cos(\phi - \beta) e^{-\frac{\omega R}{X''} t} \right)$$

$\beta = \arctg \frac{X''}{R}$ é o argumento da impedância equivalente

$$I_{cc3}'' = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X''^2}} \quad (1)$$

é o valor eficaz da componente alternada (simétrica) da corrente de curto-circuito trifásico subtransitário.

O valor máximo da componente contínua é:

$$I_{cont\ max} = \frac{\sqrt{2} V}{\sqrt{R^2 + X''^2}} \cos(\phi - \beta)$$

No instante inicial $t = 0$ s, a componente contínua tem o sinal contrário da componente alternada, a corrente instantânea i é igual a zero.

**A. Valor instantâneo máximo da corrente - I_p''
ou corrente de choque - I_{ch}**

A situação mais desfavorável ocorre quando a fase da tensão é igual ao argumento da impedância de curto-circuito, no instante inicial.

Para $t = 0$ s se $\phi = \beta$ ou $\beta + \pi$

$$\Rightarrow v = \sqrt{2} V \cos(\beta \text{ ou } \dots) \text{ e } i = 0$$

A sobreposição da componente alternada simétrica com a componente contínua é máxima⁽¹⁾ (Fig.1) para $t = \frac{T}{2} = 0,010 \text{ s}$

$$\cos(\omega t + \phi - \beta) = \mp 1 \quad e \quad \cos(\phi - \beta) = \pm 1$$

e obtemos a corrente de choque,

$$I_{ch} = \frac{\sqrt{2}V}{Z''_{eq}} \left(1 + e^{-\frac{\omega R}{X} \frac{T}{2}} \right) = \frac{\sqrt{2}V}{Z''_{eq}} \left(1 + e^{-\frac{1}{ta} \frac{T}{2}} \right) = \chi \sqrt{2} I''_{cc3} \quad (2)$$

Sendo χ o fator de correção que incorpora a componente contínua

$$\chi = \left(1 + e^{-\frac{1}{ta} \frac{T}{2}} \right) \quad (3)$$

ta é o tempo de amortecimento do sistema ou dos componentes elétricos (decréscimo de cerca de 63% da componente contínua).

$$ta = \frac{L}{R} = \frac{X''}{\omega R} \quad (4)$$

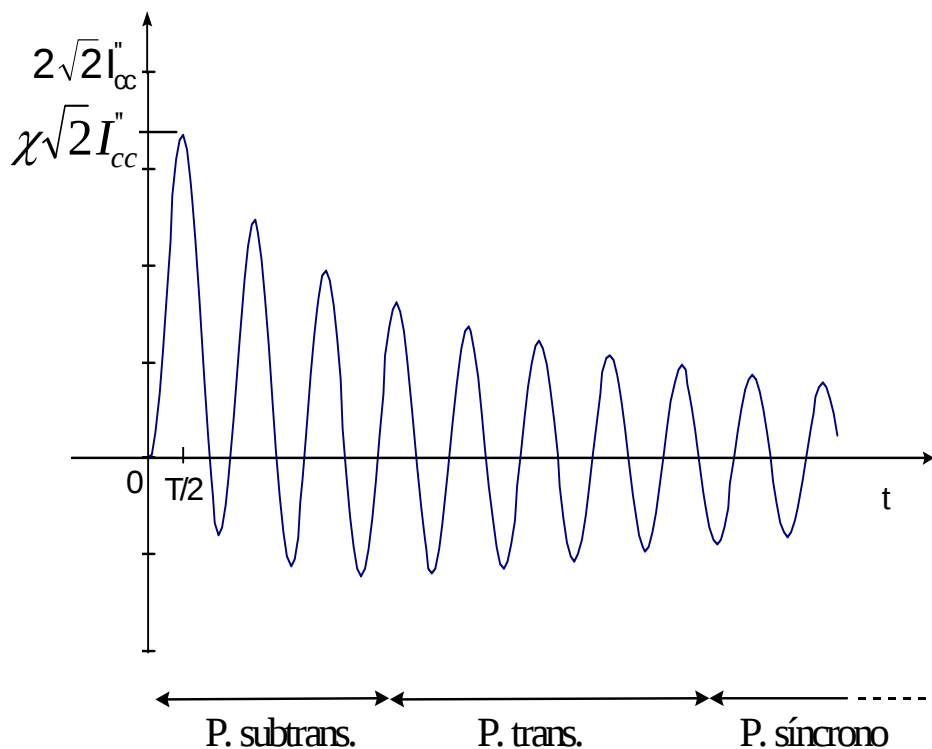


Figura 1 - Corrente instantânea de curto-circuito

⁽¹⁾ Na realidade, para baixos tempos de atenuação, a sobreposição máxima da corrente alternada com a componente contínua, chamada de corrente de choque, ocorre para tempos inferiores a meio ciclo, por exemplo, se $ta = 0,01 \text{ s}$, $\chi = 1,375$, no instante $t = 0,0096 \text{ s}$. Para simplificação de cálculos e de programação, a aproximação da ocorrência da corrente de choque ao meio ciclo ($T/2$) introduz, no máximo, um erro de aproximação por defeito de 0,51%.

Na figura 2 é apresentado o fator que inclui a contribuição da componente contínua (3) na corrente de choque, em função do tempo de amortecimento do circuito ou tempo de atenuação da respetiva componente contínua (4).

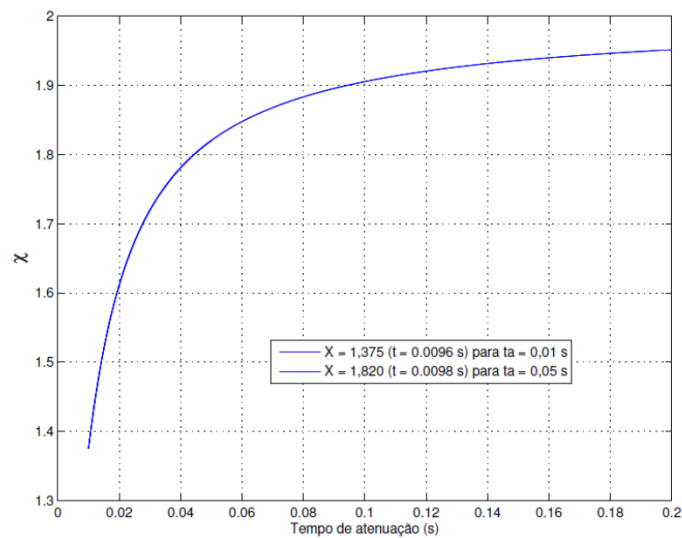


Figura 2 - Contribuição da componente contínua

Esta situação não ocorre simultaneamente nas três fases (nas outras fases a situação não é tão crítica) .

NOTA 1.

Nas simulações e cálculos seguintes das forças eletromagnéticas atribuiu-se a χ o valor aproximado de 1,82, para o cálculo da corrente de choque, que corresponde a um tempo de amortecimento de 2,5 ciclos ($t_a = 0,050$ s).

B. Fator de correção da força Eletromagnética

A força instantânea entre dois condutores (no exemplo fases a e b de um sistema trifásico) de comprimento L (m) e separados pela distância d (m), é dada pela expressão,

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_a i_b \frac{L}{d} (N) \quad \text{e } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$$

Na situação de um deles ser percorrido pela corrente de choque (corrente máxima instantânea de curto-circuito) vai ocorrer num determinado instante a força máxima eletromagnética. A força em função do tempo é :

$$F = C \left(\sqrt{2} I_{cc3} \right)^2 \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{t_a}} \right) \left(\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) e^{-\frac{t}{t_a}} \right)$$

onde :

$$C = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{L}{d} \quad (5)$$

Dividindo a força F por $C I_{ch}^2 = C (\chi \sqrt{2} I_{cc3}'')^2$ obtemos o fator de correção K (6) para a expressão da força (7) em função da corrente de choque.

$$K = \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left(\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(-\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\omega \tau}} \right)^{-2} \quad (6)$$

A força eletromagnética (7) vem assim expressa em função da corrente de choque (2) que percorre um dos condutores e do parâmetro geométrico do sistema trifásico (5).

$$F = K C (\chi \sqrt{2} I_{cc3}'')^2 \quad (7)$$

II. CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO SIMÉTRICO CONDUTORES EM ESTEIRA

A força máxima sobre um condutor depende da ocorrência da corrente de choque e da fase onde esta se estabelece. Tendo em conta que, pelo princípio da ação e reação, a soma vetorial das forças em qualquer instante é igual a zero, a força máxima só se verifica num determinado condutor do sistema trifásico (figura 6). Como a componente contínua é atenuada no tempo, a força máxima só se verifica num determinado instante. Considerou-se nos estudos apresentados o tempo de atenuação (4) da componente contínua $\tau_a = 0,050$ s ($\chi = 1,82$).

Devido à assimetria geométrica da distribuição das fases simulou-se a ocorrência da corrente de choque, tanto no condutor intermédio como num dos condutores exteriores. Verifica-se sempre o cumprimento do princípio da conservação da carga, a soma das correntes instantâneas nas três fases é igual a zero (figura 7).

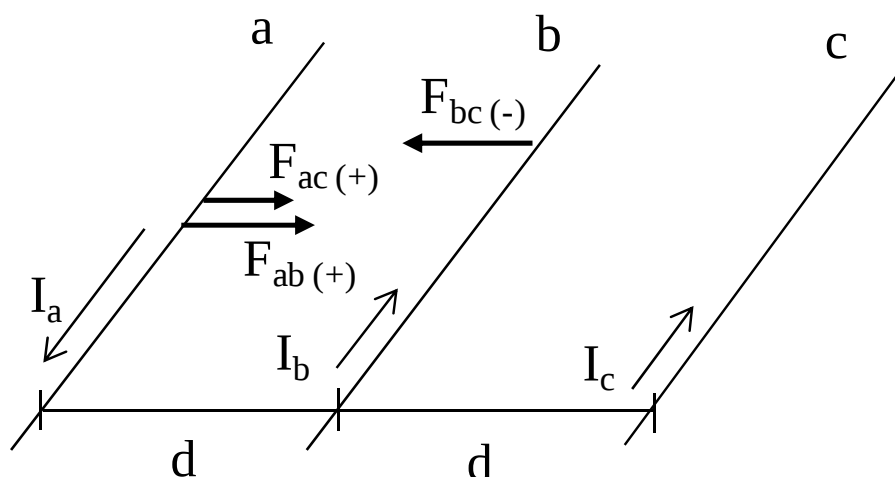


Figura 3 - Forças entre condutores em esteira

A. Corrente de choque no condutor intermédio (fase b)

A.1. Força sobre o condutor exterior (fase a)

O fator de correção da força (K) é dado pela expressão (8), soma vetorial das forças sobre o condutor a (figura 3).

$$K_a = - \left(\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \cos(+\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}} \right) \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau a}} \right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau a^2}} \right)^{-2} - \left(\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \cos(+\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}} \right) \left(\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(-\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}} \right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau a^2}} \right)^{-2} \times 0,5 \quad (8)$$

A força resultante é máxima no instante $t = 0,0125$ s e $K_{max} = 0,582$ (figura 4).

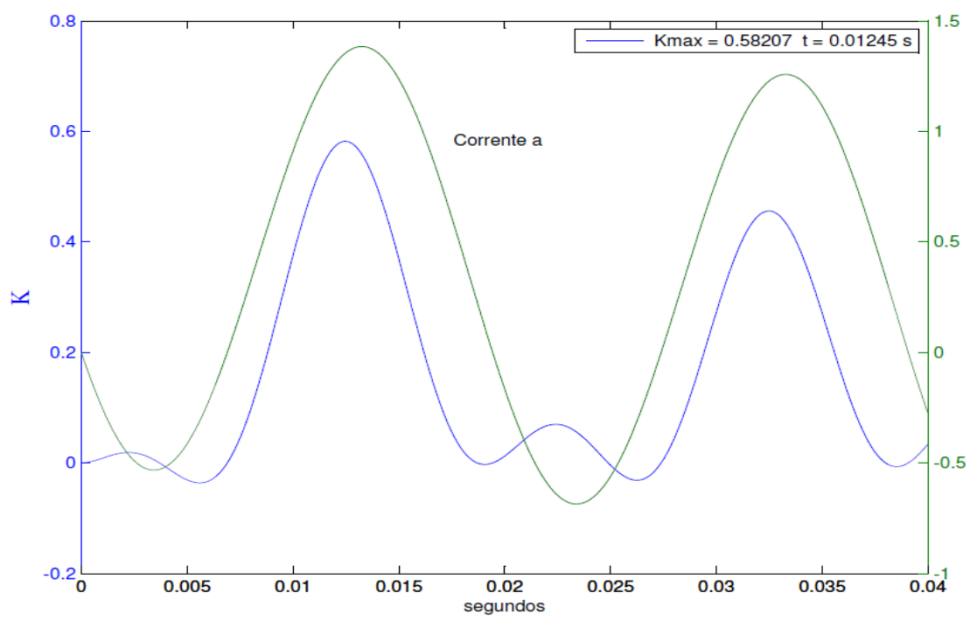


Figura 4 - Força e corrente no condutor exterior a

A.2. Força sobre o condutor intermédio (fase b)

O fator de correção da força (K) é dado pela expressão (9), soma vetorial das forças sobre o condutor b (figura 3).

$$K_b = \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau a}} \right) \left(\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \cos(+\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}} \right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau a^2}} \right)^{-2} - \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau a}} \right) \left(\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(-\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}} \right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau a^2}} \right)^{-2} \quad (9)$$

A força resultante é máxima no instante $t = 0,0067$ s e $K_{\max} = 0,623$ (figura 5).

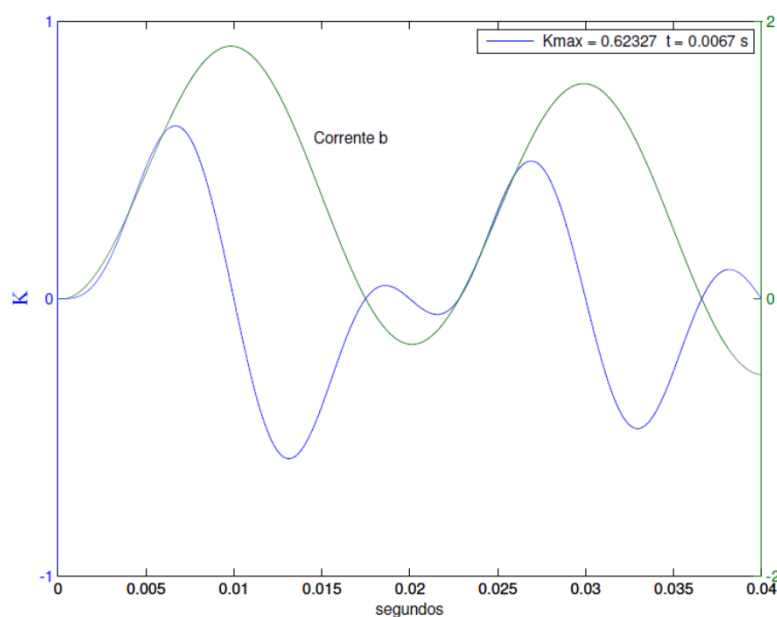


Figura 5 - Força e Corrente no condutor intermédio b

De igual modo podemos calcular a força máxima sobre o outro condutor exterior (fase c) e obtinha-se $t = 0,0073$ s e $K_{\max} = 0,627$. Se a corrente de choque ocorre no condutor intermédio o fator de correção da força máxima é inferior a 0,63 (figura 6).

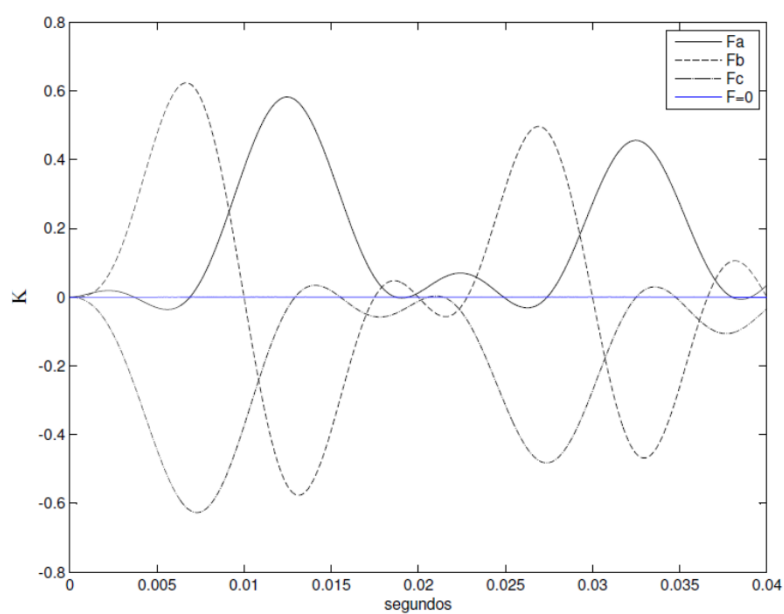


Figura 6 - Fator de correção das forças nos condutores abc

A sequência das correntes nas fases (bca) apresentada na figura 7 é válida para qualquer sequência do sistema trifásico simétrico (abc ou cab), e para a fase onde ocorre a corrente de choque.

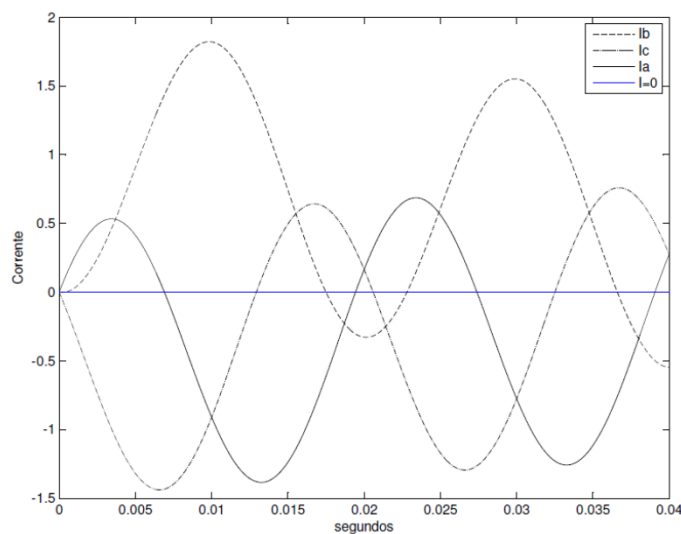


Figura 7 - Correntes de curto-circuito com $\chi = 1,82$ na fase b

B. Corrente de choque no condutor exterior (fase a)

B.1. Força sobre o condutor exterior (fase a)

O fator de correção da força (K) é dado pela expressão (10), soma vetorial das forças sobre o condutor a (figura 3).

$$K_a = -\left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau_a}}\right)\left(\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(-\frac{2\pi}{3})e^{-\frac{t}{\tau_a}}\right)\left(1 + e^{-\frac{1}{\tau_a^2}t}\right)^{-2} - \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau_a}}\right)\left(\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \cos(+\frac{2\pi}{3})e^{-\frac{t}{\tau_a}}\right)\left(1 + e^{-\frac{1}{\tau_a^2}t}\right)^{-2} \times 0,5 \quad (10)$$

A força resultante é máxima no instante $t = 0,0090$ s e $K_{\max} = 0,796$ (figura 8).

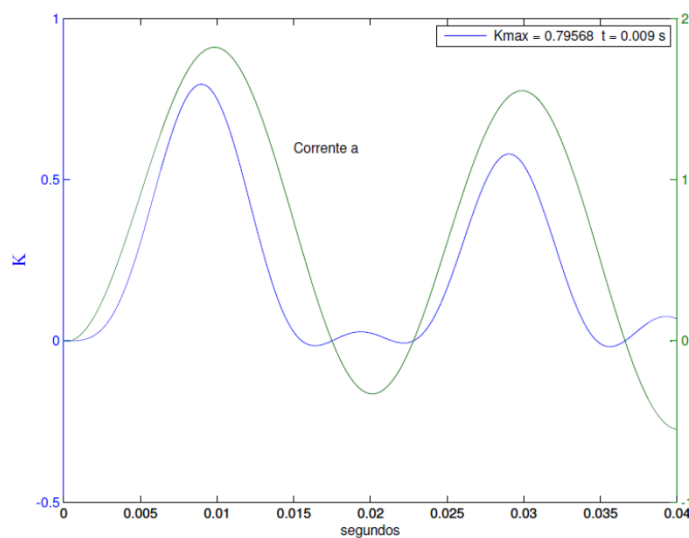


Figura 8 - Força e Corrente no condutor exterior a

B.2. Força sobre o condutor intermédio (fase b)

O fator de correção da força (K) é dado pela expressão (11), soma vetorial das forças sobre o condutor b (Fig.3).

$$K_b = \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left(\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(-\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau} \frac{T}{2}} \right)^{-2} - \left(\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(-\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left(\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \cos(+\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau} \frac{T}{2}} \right)^{-2} \quad (11)$$

A força resultante é máxima no instante $t = 0,0088 \text{ s}$ e $K_{\max} = 0,849$ (figura 9).

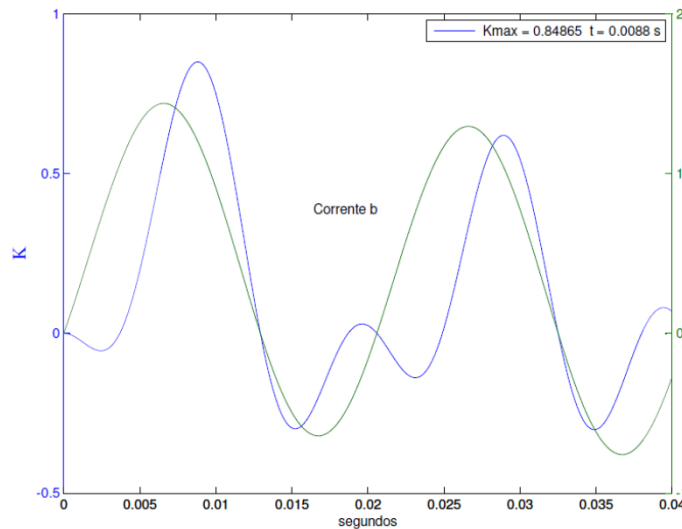


Figura 9 - Força e Corrente no condutor intermédio b

NOTA 2.

Nos gráficos de Força e Corrente, alguns sinais foram trocados por comodidade da apresentação.

O sistema de forças sobre os condutores em esteira está representado na figura 10, verificando-se que a força máxima ocorre no condutor intermédio, quando o condutor exterior é percorrido pela corrente de choque.

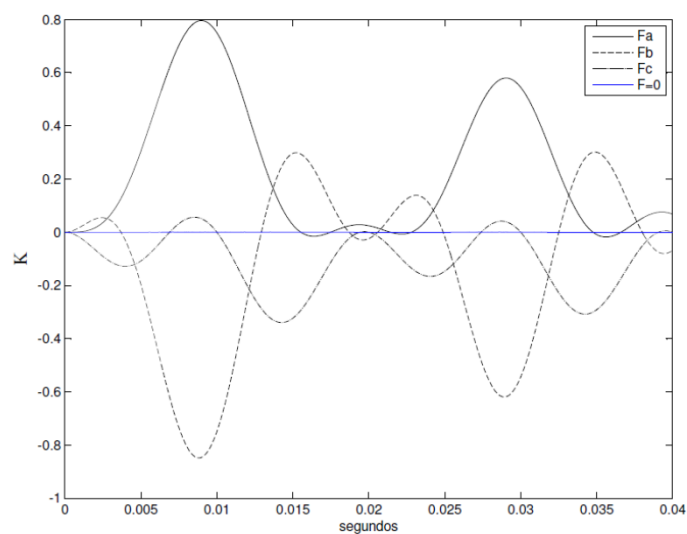


Figura 10 - Fator de correção das forças nos condutores abc

Neste estudo analisou-se a variação do K_{max} , para a situação mais desfavorável (B.2), em função do tempo de atenuação da componente contínua (4). Verifica-se que o fator de correção da força máxima, em função da corrente de choque, diminui quando o tempo de atenuação aumenta (figura 11). Os resultados demonstram a especial importância da contribuição da componente contínua (3) e do tempo de atenuação.

Fator de correção da força máxima - condutores em esteira:

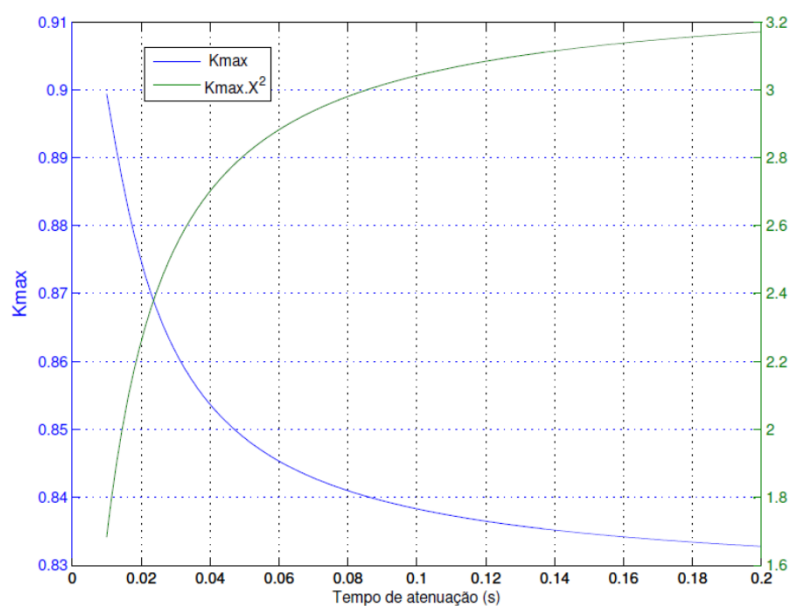


Figura 11 - Fator de correção K_{max} e fator $K_{max} \cdot \chi^2$

Conhecido o tempo de atenuação (4), é mais indicado e correto calcular a força máxima a partir do fator $K_{max} \cdot \chi^2$ e da corrente de curto-circuito trifásico simétrico subtransitório (1). O valor do respectivo fator é sempre inferior a 3,3 ($t_a = \text{inf.}$).

$$F_{max} = C K_{max} \cdot \chi^2 \left(\sqrt{2} I_{cc3}'' \right)^2 \quad (12)$$

III. CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO SIMÉTRICO - CONDUTORES EM TRIÂNGULO

A força máxima sobre um condutor depende apenas da ocorrência da corrente de choque numa qualquer das fases. Devido à simetria geométrica da distribuição das fases simulou-se a ocorrência da corrente de choque no condutor a.

Verificou-se a força máxima no condutor onde ocorre a corrente de choque, nos outros condutores a força é inferior. Considerou-se, igualmente como no ponto (II), nos estudos apresentados o tempo de atenuação da componente contínua $t_a = 0,050 \text{ s}$ ($\chi = 1,82$).

Devido à simetria geométrica da distribuição das fases a força sobre um condutor resulta da soma vetorial no plano xy das forças entre os condutores. É indiferente a sequência de colocação das fases.

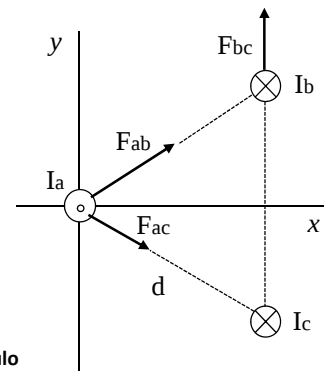


Figura 12 - Forças entre condutores em triângulo

A. Corrente de choque no condutor a

A.1. Força sobre o condutor a

O fator de correção da força (K) é dado pelas expressões abaixo, soma vetorial das forças sobre o condutor a (figura 12).

$$K_{ax} = -\left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau a}}\right) \left(\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(-\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}}\right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau a^2}}\right)^{-2} x \frac{\sqrt{3}}{2} - \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau a}}\right) \left(\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \cos(+\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}}\right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau a^2}}\right)^{-2} x \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (13)$$

$$K_{ay} = -\left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau a}}\right) \left(\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(-\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}}\right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau a^2}}\right)^{-2} x 0,5 + \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau a}}\right) \left(\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \cos(+\frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{t}{\tau a}}\right) \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau a^2}}\right)^{-2} x 0,5 \quad (14)$$

$$K_a = \sqrt{K_{ax}^2 + K_{ay}^2} \quad (15)$$

A força resultante é máxima no instante $t = 0,0098$ s e $K_{max} = 0,868$ (figura 13).

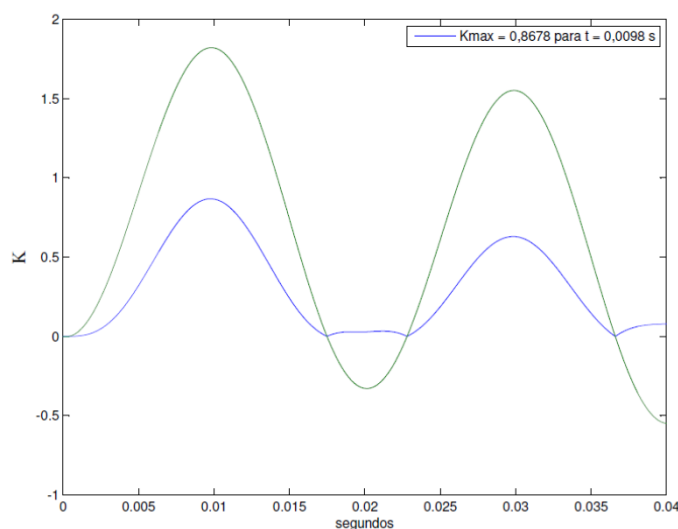


Figura 13 - Força e Corrente no condutor a

Na figura 14 apresenta-se a trajetória da força sobre o condutor a onde ocorre a corrente de choque, de 0 a 0,04 s.

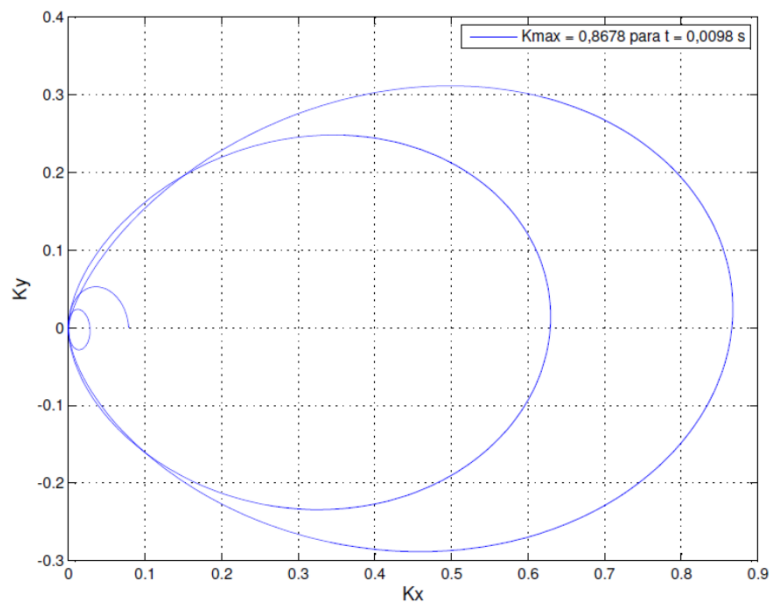


Figura 14 - Trajetória da força sobre o condutor a (2 ciclos)

A.2. Força sobre o condutor b

A força resultante é máxima no instante $t = 0,0074$ s e $K_{max} = 0,629$ (figura 15).

O sistema de forças sobre os condutores em triângulo está representado na figura 15, verificando-se que a força máxima ocorre no condutor que é percorrido pela corrente de choque.

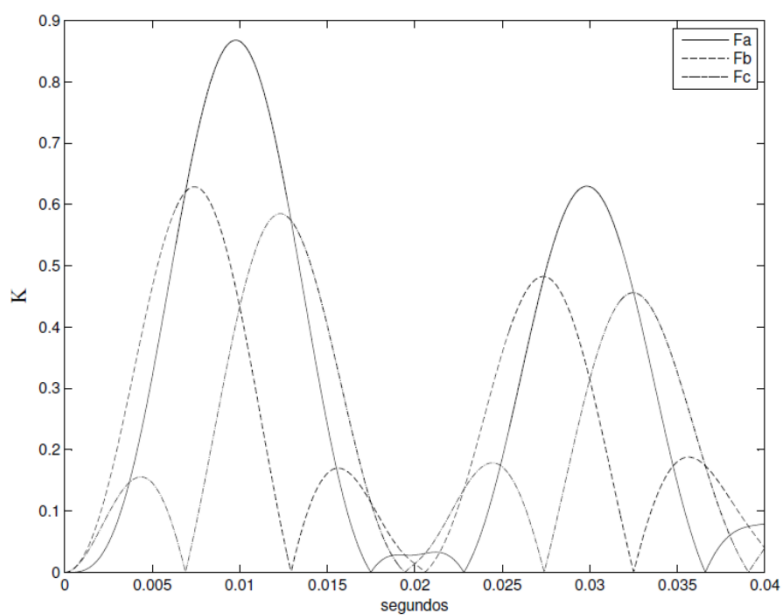


Figura 15 - Módulos do fator de correção das forças em triângulo

Analisou-se a variação do K_{max} , para a situação mais desfavorável (III A.1), em função do tempo de atenuação da componente contínua. De igual modo, verifica-se que o fator de correção da força máxima, em função da corrente de choque, diminui quando o tempo de atenuação aumenta (figura 16). Os resultados demonstram igualmente a especial importância da contribuição da componente contínua (3) e do tempo de atenuação.

Fator de correção da força máxima -condutores em triângulo

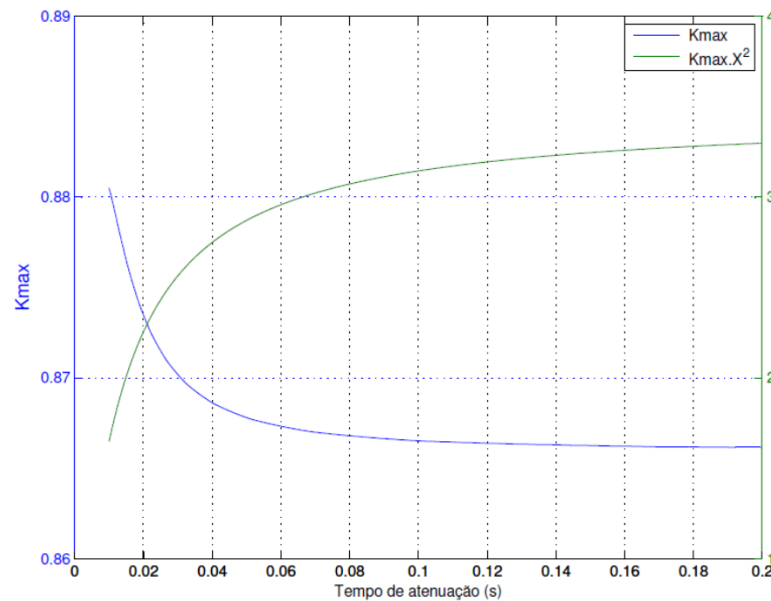


Figura 16 - Fator de correção K_{max} e fator $K_{max} \cdot \chi^2$

Conhecido o tempo de atenuação t_a e a corrente de curto-circuito trifásico simétrico I''_{cc3} , a força máxima é dada pela expressão,

$$F_{max} = C K_{max} \cdot \chi^2 \left(\sqrt{2} I''_{cc3} \right)^2 \quad (16)$$

O valor do fator $K_{max} \cdot \chi^2$ é sempre inferior a 3,5.

IV. CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO SEM TERRA

O estudo do curto-circuito bifásico sem terra serve apenas para verificar as situações mais desfavoráveis nas solicitações mecânicas das forças eletromagnéticas entre condutores, e verificar os valores estabelecidos nas normas técnicas.

Considerou-se, igualmente como nos pontos (II, III), nos estudos apresentados o tempo de atenuação da componente contínua $t_a = 0,050$ s ($\chi = 1,82$).

A. Corrente de choque nos condutores a e b - Força sobre o condutor a ou b

O fator de correção da força (K) é dado pela expressão (17), resultado da tensão nominal e do dobro da impedância equivalente de curto-circuito.

$$K_a = \frac{3}{4} \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau_a}} \right)^2 \left(1 + e^{-\frac{1}{\tau_a^2}} \right)^{-2} \quad (17)$$

A força é máxima no instante $t = 0,0099$ s e $K_{\max} = 0,751$ (figura 17).

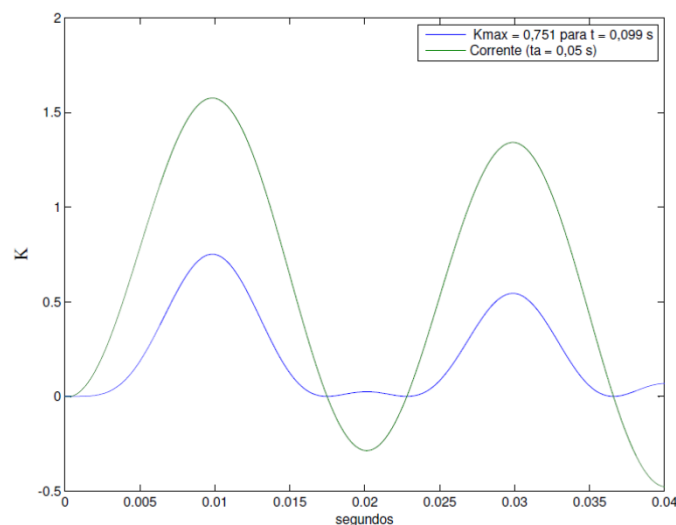


Figura 17 - Força e Corrente no condutor a ou b

Analisou-se a variação do $K_{\max}$ (Fig.18), em função do tempo de atenuação da componente contínua (4). A força máxima pode também ser expressa em função da corrente de curto-circuito trifásico simétrico, I''_{cc3} .

Fator de correção da força máxima - entre condutores no curto-circuito bifásico sem terra.

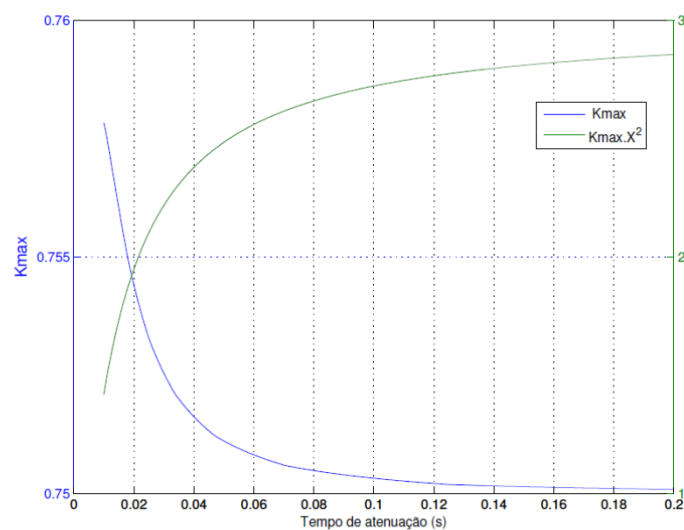


Figura 18 - Fator de correção $K_{\max}$ e fator $K_{\max} \cdot x^2$

NOTA 3.

No estudo das solicitações mecânicas deve-se também ter em conta a força de repulsão sobre o condutor exterior de uma fase multifilar de n condutores, separados por uma distância d' , devido à corrente que se reparte pelos n condutores.

$$F'_{max} = C' \chi'^2 \left(\sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k} \right) \left(\frac{\sqrt{2} I''_{cc3}}{n^2} \right)^2 \quad \text{para } n > 1$$

$$C' = \frac{\mu_0 L}{2\pi d'}$$

V. CONCLUSÃO

O fator de correção da força máxima é normalmente majorado para o dimensionamento dos condutores, às solicitações mecânicas, podendo isso levar a uma excessiva maximização e desperdício de material.

Os valores apresentados nas normas técnicas foram obtidos por aproximação, devido à dificuldade da complexidade de cálculo dos fenómenos considerados.

Nas situações menos problemáticas, como curto-circuito em baixa tensão e com tempos de atenuação da componente contínua inferiores a 0,02 s, os fatores de correção poderão, eventualmente, ficar subestimados.

Nas situações de elevada potência de curto-circuito, como nos terminais à saída dos geradores ou nos transformadores de Alta Tensão, tendo em conta tempos de amortecimento superiores, os fatores tenderão a ser sobreavaliados.

A corrente de curto-circuito trifásica simétrica é normalmente sobreavaliada quando se considera apenas a reactância subtransitória equivalente, e a ocorrência da corrente de choque é reduzida, não havendo necessidade de majorar os fatores de correção das forças máximas sobre os condutores.

Os valores obtidos nos programas de cálculo computacional são exaustivos e permitiram obter, no espaço temporal, valores precisos para as diversas configurações do sistema elétrico. Os programas de cálculo foram desenvolvidos em MATLAB, e obteve-se resultados de elevado rigor, o que poderá permitir, se tal for necessário, a correção e melhoramento dos valores apresentados e recomendados pelas normas técnicas.

Em vez de se fixar o fator de correção da força máxima (K_{max}) em função da corrente de choque, o conhecimento ou previsão do tempo de atenuação (t_a) da componente contínua permite obter com melhor precisão a força máxima em função da corrente de curto-circuito trifásico simétrico subtransitório.

O caos organizado.

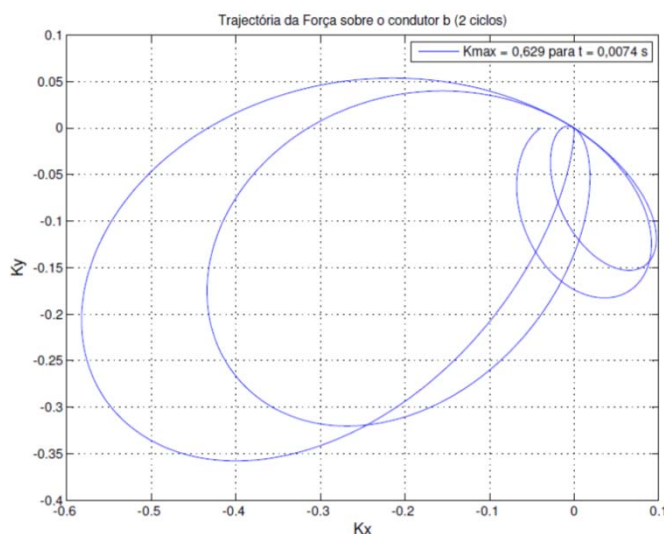


Figura 19. Condutores em triângulo (Fig.12) - Trajetória da força sobre o condutor b (2 ciclos), com corrente de choque ($\chi = 1,82$) no condutor a

REFERÊNCIAS

- Apostol – Calculus Vol2, Editora Editorial Reverté
 Alonso & Finn – Física Vol2, Campos e Ondas, Editora Edgard Blucher
 Feynman – Leituras sobre a Física Vol2, Electromagnetismo, Editora Addison Wesley
 MATLAB Academic – Linguagem de programação técnica, MathWorks, Inc
 Normas IEC 60865 – Correntes de curto-circuito

COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:



Alfredo Verónico da Silva

alfredo@sgotf.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto
Aluno de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica -Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto
Responsável pedagógico na entidade formadora SGO-Tecnologia e Formação, Lda.



António Augusto Araújo Gomes

aag@isep.ipp.pt

Mestre (pré-bolonha) em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
Doutorando na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia (UTAD).
Docente do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 1999.
Coordenador de Obras na CERBERUS - Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999.
Prestação, para diversas empresas, de serviços de projeto de instalações elétricas, telecomunicações e segurança, formação, assessoria e consultoria técnica.
Investigador do GECAD (Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão), do ISEP, desde 1999.



António Silva

antonio.silva@efapel.pt

Engenheiro Eletrotécnico licenciado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
Responsável pelo Serviço de Apoio Técnico da EFAPEL- Empresa Fabril de Produtos Elétricos, S.A."



Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva

hjs@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica, em 1979, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, opção de Produção, Transporte e Distribuição de Energia.
Diploma de Estudos Avançados em Informática e Eletrónica Industrial pela Universidade do Minho.
Mestre em Ciências na área da Eletrónica Industrial.
Professor Adjunto Equiparado do ISEP, lecionando na área da Teoria da Eletricidade e Instalações Elétricas.



Infocontrol – Eletrónica e Automatismo, Lda

www.infocontrol.pt

O Grupo Infocontrol é formado por um conjunto de empresas comerciais especializadas em engenharia, que operam nas áreas da Indústria, Edifícios e Segurança. A sua atividade baseia-se na inovação, precisão técnica e no apoio que presta a todos os clientes. As empresas do Grupo (Infocontrol, QEnergia e Novalec) cooperam particularmente com projetistas e empresas de engenharia nas seguintes áreas: Medida, Gestão, Informação, Segurança.



José António Beleza Carvalho

jbc@isep.ipp.pt

Nasceu no Porto em 1959. Obteve o grau de B.Sc em engenharia eletrotécnica no Instituto Superior de Engenharia do Porto, em 1986, e o grau de M.Sc e Ph.D. em engenharia eletrotécnica na especialidade de sistemas de energia na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em 1993 e 1999, respetivamente.
Atualmente, é Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, desempenhando as funções de Director do Departamento.

COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:



Miguel Leichsenring Franco

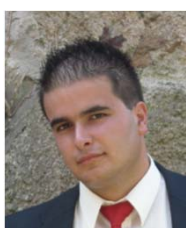
m.franco@schmitt-elevadores.com

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Master in Business Administration (MBA) com especialização em Marketing pela Universidade Católica Portuguesa – Lisboa.

Licenciado em Administração e Gestão de Empresas pela Universidade Católica Portuguesa – Porto.

Administrador da Schmitt-Elevadores, Lda.



Pedro Manuel Pereira Costa

1070173@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto

Aluno de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica -Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto

Formador Profissional na área de Eletrónica e Energia na SGO-Tecnologia e Formação, Lda



Roque Filipe Mesquita Brandão

rfb@isep.ipp.pt

Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Professor Adjunto no Instituto Superior de Engenharia do Porto, departamento de Engenharia Eletrotécnica.

Consultor técnico de alguns organismos públicos na área da eletrotecnia.



Rui Manuel de Moraes Sarmiento

rms@isep.ipp.pt

Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica, pela FEUP. Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, pela FEUP.

Diretor de planeamento e produção na empresa FERSEQUE, entre 1982 e 1987

Diretor e coordenador de Cursos de Ação de Formação em Controlo da Qualidade, ISEP entre 1989 e 2001

Assistente das disciplinas Física Atómica e Termodinâmica dos Cursos de Eng^a Química e Eng^a Civil, da FEUP em 1975.

Professor Adjunto do Quadro do Instituto Superior de Engenharia do Porto, em 1993



Sérgio Filipe Carvalho Ramos

scr@isep.ipp.pt

Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Aluno de doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do curso de Sistemas Elétricos de Energia do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 2001.

Prestação, para diversas empresas, de serviços de projeto de instalações elétricas, telecomunicações e segurança, formação, assessoria e consultoria técnica.

Investigador do GECAD (Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão), do ISEP, desde 2002.



Vera Lúcia Paiva da Silva

Licenciatura e Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e Eletrónica no Imperial College London.

Ocupa atualmente a posição de "Expert Research Engineer" no Departamento de Funcionamento e Economia dos Sistemas de Energia na Unidade de Investigação e Desenvolvimento (EDF R&D) da Eletricidade de França (EDF SA) tendo exercido anteriormente (2009-2011) o cargo de Gestora de Projetos na mesma empresa.

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO PÓS-GRADUADA EM Projeto de Instalações Elétricas

OBJETIVOS

Promover competências aos pós-graduados no âmbito do projeto, execução, exploração e utilização de instalações elétricas de serviço público e serviço particular e, de uma forma integrada, abordar todos os assuntos relacionados com a conceção de instalações elétricas de média e baixa tensão.

DESTINATÁRIOS

O curso destina-se a bacharéis, licenciados e mestres recém formados na área da Engenharia Eletrotécnica e/ou Engenharia Eletrónica, assim como quadros no activo que pretendam atualizar conhecimentos ou adquirir competências no âmbito da conceção e utilização de instalações elétricas.

PLANO CURRICULAR

- Equipamentos e Sistemas de Proteção
- Instalações Elétricas
- Técnicas e Tecnologias de Eficiência Energética
- Projeto Integrador

LOCAL

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Tel. 228 340 500 – Fax: 228 321 159

Info: jbc@isep.ipp.pt

