

Avanços nos Recursos dos Relés de Proteção de Motores

Ricardo Abboud, Paulo Lima, John Needs e Alejandro Rodriguez
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Dibyendu Bhattacharya
BP Exploration Operating Co., Ltd.

Apresentado na
PCIC Europe Conference
Berlim, Alemanha
14–16 de junho de 2016

Traduzido para o português em fevereiro de 2017

AVANÇOS NOS RECURSOS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO DE MOTORES

Copyright Material PCIC Europe

Ricardo Abboud
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
2350 NE Hopkins Court
Pullman, WA 99163
EUA

Dibyendu Bhattacharya
BP Exploration Operating Co., Ltd.
Chertsey Road, Sunbury
Reino Unido

Paulo Lima
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
Avenida Pierre Simon de Laplace, 633
Condomínio Techno Park
Campinas, São Paulo 13069-320
Brasil

John Needs
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
Unit 19, Hollins Business Centre
Rowley Street, Stafford, ST16 2RH
Reino Unido

Alejandro Rodriguez
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
Hurksestraat 43, 3rd Floor
Eindhoven 5652 AH
Holanda

Sumário—Os algoritmos usados pelos relés numéricos na proteção térmica de motor simulam com precisão as características do motor. Estes algoritmos usam a velocidade do motor para calcular o aquecimento do rotor. Isso resulta na partida adequada para cargas de alta inércia conectadas aos motores e minimiza o tempo de resfriamento, proporcionando re-partidas mais rápidas. Estes algoritmos são executados em um relé numérico que também efetua o registro e a plotagem das características de partida. Dessa forma, pode-se obter um registro preciso do desempenho do motor, fornecendo uma indicação de possível falha do motor. Barras rompidas do rotor causam a redução do torque de aceleração, aumento do aquecimento do motor e aumento das vibrações, podendo causar danos graves ao motor. Os modernos relés numéricos de motor monitoram o espectro da corrente do estator para componentes de frequência associados a este fenômeno e usam a análise da assinatura da corrente do motor para detectar barras rompidas no rotor. Para aumentar a segurança, estes dispositivos também podem incluir a proteção de arco voltaico, permitindo que faltas no conjunto de manobra (cubículo) possam ser rapidamente detectadas e eliminadas.

Palavras-chave—Proteção de motor, modelo térmico, proteção de arco voltaico, barras rompidas do rotor.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de motores elétricos representam cerca de 60% do consumo da eletricidade industrial global [1]. Eles são fundamentais para os processos industriais. Uma operação indesejada do sistema de proteção do motor pode levar a perdas econômicas substanciais e pode até comprometer a segurança da operação da planta.

A principal função dos sistemas elétricos de potência industriais consiste em fornecer energia para estes motores elétricos. Os motores estão sujeitos a faltas e condições anormais que podem causar danos substanciais. O dano no motor pode provocar atrasos em processos industriais, com perdas econômicas

correspondentes. Por esta razão, um sistema de proteção confiável do motor é fundamental para aumentar a confiabilidade dos processos industriais. Este artigo discute os elementos-chave da criação de um sistema confiável de proteção de motor, incluindo a modelagem térmica, a detecção de barras rompidas no rotor e a detecção de arco voltaico.

A proteção térmica é necessária para detectar e proteger motores elétricos contra condições anormais como sobrecarga, rotor travado, partidas frequentes, desequilíbrio, operação com tensão baixa, e outras.

Instalações que utilizam relés eletromecânicos têm pouca ou nenhuma capacidade de rastrear com precisão as condições de aquecimento do motor. No caso de motores industriais de grande porte, apenas relés numéricos ou dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs: "Intelligent Electronic Devices") com algoritmos especiais são capazes de simular adequadamente as condições térmicas do rotor e do estator. Os modernos relés numéricos representam a escolha natural para aplicações de *retrofit*, oferecendo muitas melhorias em relação aos relés eletromecânicos ou estáticos. Estas melhorias incluem modelagem térmica avançada do aquecimento do motor, relatórios de evento, relatórios sequenciais de evento, relatórios de partida do motor, estatísticas de operação do motor, recursos de proteção adicionais (tais como a detecção de barras rompidas do rotor em motores de indução) e funções de controle adicionais (tais como a partida de motores síncronos). Um modelo térmico abrangente que representa precisamente o aquecimento do motor é discutido posteriormente neste artigo.

De acordo com pesquisas efetuadas pelo EPRI ("Electric Power Research Institute") e IEEE ("Institute of Electrical and Electronics Engineers"), 5% das falhas de motor acontecem devido a problemas na gaiola do rotor [2]. A detecção precoce de uma barra rompida do rotor é muito importante para minimizar os danos no motor e reduzir o tempo fora de operação, consequentemente reduzindo os custos de reparo e operação. A condição de barra rompida pode ser iniciada por uma ruptura na junção entre a barra do rotor e o anel de extremidade ("end ring") como resultado de fatores que causam

estresse térmico e mecânico. Motores com cargas de alta inércia são mais suscetíveis a uma condição de barra rompida do rotor durante a partida [2]. A análise da assinatura da corrente do motor (MCSA: “Motor Current Signature Analysis”) é o método mais popular para detectar faltas na gaiola do rotor, o qual será discutido posteriormente neste artigo.

Todos os dias, nos Estados Unidos, ocorrem dez incidentes de arco voltaico reportáveis para a Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA-reportable: “Occupational Safety and Health Administration-reportable”) [3]. Além disso, até 80% de todos os ferimentos em trabalhadores da área elétrica são devidos a queimaduras externas originadas pela intensa energia de calor radiante de um arco elétrico [3].

Os sensores de detecção de arco voltaico fornecem um método custo-eficiente para reduzir a energia do arco voltaico por meio da redução dos tempos de detecção. A detecção da luz em alta velocidade combinada com a supervisão do elemento de sobrecorrente de alta velocidade e contatos de saída de alta velocidade podem fornecer um método confiável, seguro e rápido para dar trip. Isto, por sua vez, pode contribuir para a redução dos danos aos equipamentos e aumentar significativamente a segurança das equipes de trabalho. Os relés numéricos de motor podem usar múltiplos sensores para detecção de arco voltaico. Os sensores mais comuns são os sensores de lentes pontuais e os sensores de fibra óptica descoberta.

II. MODELOS TÉRMICOS

A. Limites Térmicos do Motor

As limitações térmicas dos motores de indução são especificadas por curvas de limite térmico que são plotagens das temperaturas limites do rotor e do estator em unidades de I^2t , onde I é a corrente do estator equilibrada de sequência-positiva para um motor trifásico e t é o tempo. As curvas para um motor de 7000 HP, 6.6 kV, 900 rpm, são mostradas na Fig. 1.

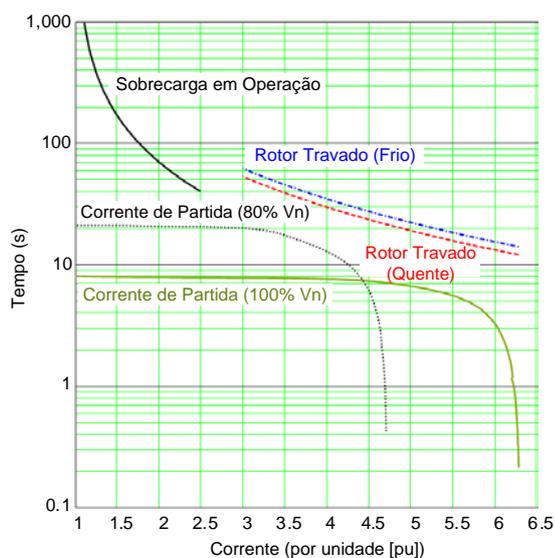


Fig. 1 Curvas de limite térmico para um motor de 7000 HP

As curvas de partida são uma indicação da quantidade de tempo e corrente associada para o motor acelerar de uma condição de motor parado para uma condição de plena operação. A Fig. 1 exibe duas curvas de partida: a curva contínua representa o motor partindo com tensão nominal e a curva tracejada representa o motor partindo com 80% da tensão nominal.

A proteção térmica é necessária para detectar e proteger motores elétricos contra condições anormais. Desequilíbrios produzem correntes de sequência-negativa que podem causar o sobreaquecimento do rotor [4]. Uma condição de baixa tensão, se ocorrer durante a operação normal do motor, pode levar o motor a travar (“jam”). Se ocorrer uma condição de baixa tensão durante a partida, o motor pode não partir normalmente porque o torque do motor pode ser menor do que o torque da carga. Em ambos os casos, a sobrecorrente resultante pode danificar o motor. O travamento do motor (“stall”) ocorre durante a operação de partida quando o torque do motor não pode superar o torque da carga e o motor não consegue começar a se mover.

A causa de um rotor travado pode ser um defeito nos mancais da carga, um defeito nos mancais do motor, uma baixa tensão de alimentação, alimentação monofásica, ou uma carga que exceda o torque do motor. Quando o rotor está travado, o estator imita um transformador com uma resistência de carga no secundário e é submetido a uma corrente tipicamente igual a 6 vezes a corrente nominal. Como a resistência do rotor durante a ocorrência de um rotor travado é 3 vezes maior do que durante condições de operação, o aquecimento efetivo devido às perdas ôhmicas no rotor é da ordem de 108 vezes maior do que em operação normal [5].

B. Modelo Térmico de Primeira Ordem

A proteção térmica do motor é responsável pela remoção da alimentação antes que a temperatura de um motor atinja valores acima do nível máximo permitido pelas curvas de limites térmicos. O aquecimento real do motor pode ser calculado usando um modelo térmico que represente o sistema térmico do motor, como mostrado na Fig. 2.

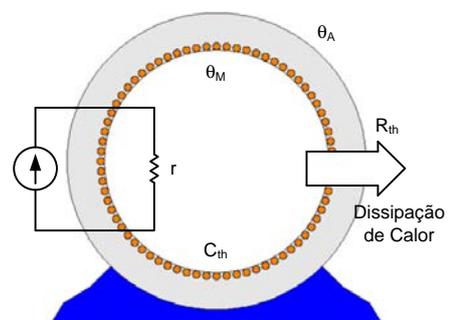


Fig. 2 Sistema térmico do motor

A potência elétrica aplicada a um motor é parcialmente convertida em calor que é armazenado no motor, causando o aumento da temperatura. Portanto, a temperatura é uma função da corrente e do tempo. Estas variáveis são a base do modelo térmico que representa a temperatura do motor. Um modelo térmico

de primeira ordem é utilizado para calcular o aquecimento do motor e é aplicado na proteção térmica do motor [6].

Considere o aquecimento do motor causado pela corrente que flui através de um resistor (r) que representa a resistência dos enrolamentos do motor, conforme mostrado na Fig. 2. A temperatura ambiente é θ_A e a temperatura do motor é θ_M .

Este sistema térmico de primeira ordem simples é modelado por uma resistência térmica (R_{th}) para o meio ambiente e uma capacitância térmica (C_{th}), com o motor sendo considerado um corpo homogêneo.

A Fig.3 ilustra o modelo térmico de primeira ordem usado para representar o aquecimento do motor [5]. Os principais componentes do modelo são:

1. Fonte de calor. O fluxo de calor proveniente da fonte é $I^2 \cdot r$ watts (J/s).
2. Capacitância térmica (C_{th}). Representa a capacidade do motor para absorver calor proveniente da fonte de calor. A unidade de capacitância térmica é $J/^\circ C$.
3. Resistência térmica (R_{th}). Representa o calor dissipado por um motor para os seus arredores. A unidade de resistência térmica é $^\circ C/W$.
4. Comparador. Cria uma condição de trip quando a temperatura calculada do motor em pu (por unidade) excede um valor pré-ajustado que é baseado nos dados do fabricante do motor, conforme explicado em mais detalhes posteriormente neste artigo.

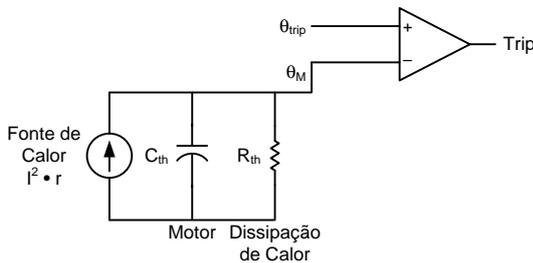


Fig. 3 Modelo térmico de primeira ordem

O calor produzido pela fonte de calor é transferido para o motor, que por sua vez dissipa o calor para o ambiente vizinho. A proteção térmica do motor é implementada nos relés numéricos modernos com base neste modelo térmico. A corrente de entrada do relé são as correntes de fase do estator. O objetivo da proteção térmica do motor consiste em permitir a partida do motor e sua operação dentro das diretrizes publicadas pelo fabricante, bem como sua atuação (trip) se a energia térmica do motor ultrapassar estes valores nominais devido a sobrecargas, corrente de sequência-negativa, ou partida com rotor travado.

Como as resistências do rotor de sequência-positiva e sequência-negativa (R_{r1} e R_{r2}) são funções da velocidade do motor, o modelo se torna não linear. Uma abordagem utilizada por alguns projetistas de relés baseia-se em dois modelos lineares para dois estágios diferentes do motor, como mostrado na Fig. 4. A corrente limite (I_{LIM}), que determina quando cada modelo se aplica, é definida pelo projetista. Certos relés utilizam um limite de 2.5 vezes a corrente de plena carga do motor.

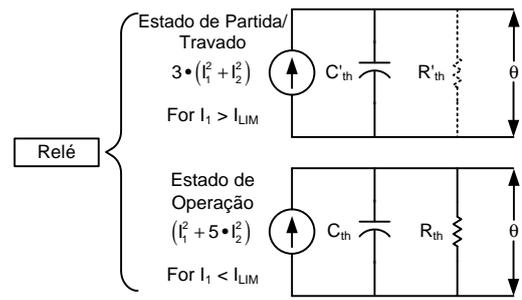


Fig. 4 Modelos térmicos para os estados de partida/travado e operação do rotor

Como o aquecimento do rotor travado ocorre em apenas alguns segundos, o modelo térmico do estado de partida/travado assume que nenhum calor é perdido para as redondezas e o resistor é removido do circuito térmico. A corrente nominal do motor com rotor travado define o valor do trip térmico.

Quando o motor está operando, ele devolve a energia térmica para os seus arredores através de radiação, condução, convecção e (em alguns casos) refrigeração forçada. O modelo térmico do estado de operação fornece um caminho para o retorno desta energia através do resistor com resistência térmica (R_{th}), como mostrado na Fig. 4.

As características térmicas do motor (R_{th} e C_{th}) dependem de muitos fatores de projeto. Entre outros, elas dependem do tamanho do motor (massa). Isso explica por que é tão difícil ou impossível emular o comportamento térmico de motores de grande porte com dispositivos bimetalicos pequenos. Esta é uma vantagem clara para os relés numéricos, nos quais é possível ajustar valores diferentes para os parâmetros do motor.

Um modelo térmico dependente do escorregamento do rotor é discutido posteriormente neste artigo.

Quando um motor é desenergizado, ele não precisa de proteção térmica por si mesmo; no entanto, ele necessita ser bloqueado e não ter permissão para ser reenergizado até que resfrie o suficiente para voltar a operar. Quando a corrente deixa de fluir no circuito térmico mostrado na Fig. 3, o circuito é reconfigurado, como ilustrado na Fig. 5, e o capacitor descarrega de acordo com o valor da R_{th} .

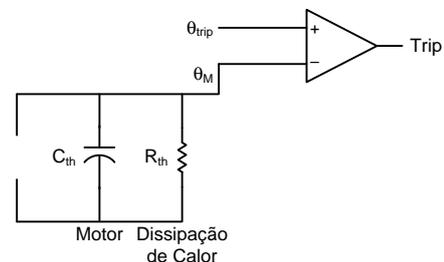


Fig. 5 Modelo térmico para o motor no estado parado

Aplicando a abordagem apresentada para a modelagem térmica, é possível emular o comportamento térmico dinâmico de um motor, como mostrado na Fig. 6, para evitar temperaturas prejudiciais para qualquer condição de operação.

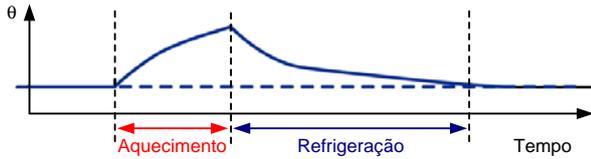


Fig. 6 Exemplo de resposta do modelo térmico para diferentes estados do motor

C. Modelos Térmicos do Estator e Rotor

Para acomodar as diferenças das propriedades térmicas do estator e do rotor, o modelo térmico de primeira ordem pode ser dividido em dois modelos térmicos separados, conforme mostrado a seguir:

1. O modelo do rotor consiste dos seguintes elementos:
 - Um elemento de partida que protege o rotor durante a sequência de partida.
 - Um elemento de operação que protege o rotor quando o motor está em rotação.
2. O modelo do estator protege o estator durante a partida e quando o motor está em operação.

1) Modelo do Rotor

No modelo do rotor, a transição de um elemento para o outro é ajustada em 2.5 vezes a corrente de plena carga nominal do motor. A solução de partida com alta inércia usando o modelo térmico dependente do escorregamento descrito na subseção seguinte afeta apenas o projeto do elemento do rotor.

Durante uma condição de motor travado ou de partida, é válido desprezar as perdas de calor para o ambiente. Isto resulta numa estimativa conservadora da temperatura para assegurar uma operação adequada, que equivale à eliminação (tornando infinita) da resistência térmica do modelo.

O limite térmico de partida do rotor é expresso em termos do tempo máximo (tempo de travamento seguro do motor – “motor safe stall time”) que a correspondente corrente de rotor travado (I_{LRA}) pode ser aplicada a um motor, tal como calculado em (1).

$$\theta_{trip} = I_{LRA}^2 \cdot T_{STALL} \quad (1)$$

A resistência do rotor com uma velocidade zero é tipicamente 3 vezes maior do que a resistência do rotor quando o motor está na sua velocidade nominal. Por esta razão, o efeito das correntes de sequência-positiva e sequência-negativa é multiplicado por um fator da fonte de calor igual a 3 no modelo térmico do rotor durante a partida do motor.

A incorporação de todas estas alterações resulta no elemento de partida I^2t do modelo térmico de primeira ordem ilustrado na Fig. 7.

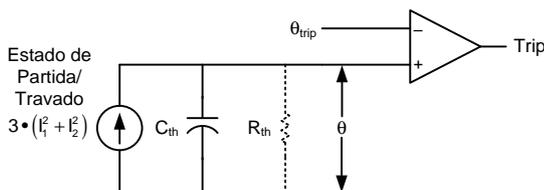


Fig. 7 Elemento de partida I^2t

Para compatibilizar com o fator da fonte de calor igual a 3, a capacitância térmica selecionada é também igual a 3. Quando a corrente de sequência-positiva do motor é igual à corrente do rotor travado, o calor estimado atinge o valor de trip dentro do limite de tempo do rotor travado. Portanto, para a proteção de partida, apenas os dados de placa do motor são necessários para o modelo térmico do rotor.

Se a resposta de temperatura deste modelo for representada graficamente em função da corrente de linha do motor, a curva de resposta é uma linha reta, tal como ilustrado na Fig. 8.

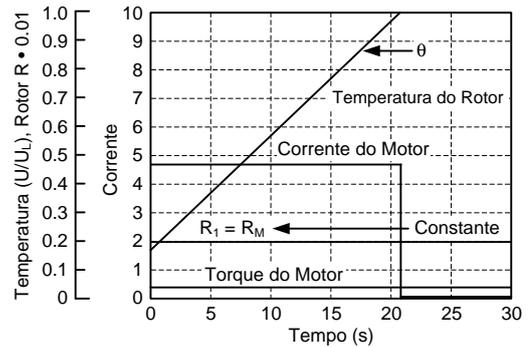


Fig. 8 Curva de resposta do elemento de partida I^2t

Observe que este modelo mantém constante a resistência do rotor em R_M , o que ocorre em uma condição de paralização (“standstill”), onde o escorregamento (S) é igual a 1.0 pu.

A Fig. 9 representa a analogia elétrica do modelo térmico de primeira ordem do rotor para a condição de operação do motor. Quando o motor está operando, ele restitui energia térmica para os seus arredores. O elemento térmico do rotor com o motor em operação fornece um caminho para o retorno desta energia através do resistor com resistência térmica (R_{th}). Neste estado, o limite de trip “resfria” exponencialmente a partir de um valor limite de rotor travado até o limite apropriado para a condição de operação usando a constante de tempo térmica do motor. Isto emula uma temperatura do motor que resfria até a condição de operação em estado de regime. Na condição de operação, o modelo considera a resistência do rotor como tendo o valor da velocidade nominal ($R_r = R_N$).

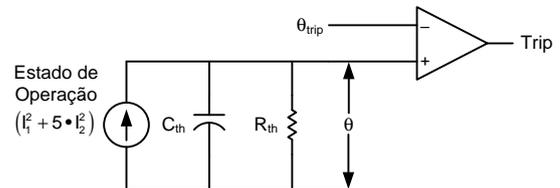


Fig. 9 Elemento térmico do rotor com motor operando

2) Modelo do Estator

As curvas de sobrecarga do motor em operação mostram o limite térmico do estator. Essas curvas atendem à equação tempo-corrente (2), onde τ é a constante de tempo térmica do estator, I é a corrente do estator em pu da corrente nominal, I_0 é a corrente inicial em pu da corrente nominal e SF (“Service Factor”) é o fator de serviço do motor. Esta equação tem a forma de um modelo térmico de primeira ordem.

$$t = \tau \cdot \ln \left(\frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - SF^2} \right) \quad (2)$$

A constante de tempo térmica do estator do motor é um parâmetro de ajuste para o modelo térmico do motor em operação, e pode ser calculada a partir das curvas dos limites térmicos do estator pela aplicação da equação (2).

A Fig. 10 mostra o circuito equivalente que corresponde ao modelo térmico de primeira ordem do estator. Neste caso, a capacitância térmica (C_{th}) é igual a constante de tempo térmica do estator (τ). Atribuir um valor igual a 1 para o resistor com resistência térmica (R_{th}) fornece um valor igual a τ para a constante de tempo ($R_{th} \cdot C_{th}$) do circuito equivalente. Como as correntes de sequência-positiva e sequência-negativa têm o mesmo efeito de aquecimento no estator, a fonte de calor é igual a $I_1^2 + I_2^2$. Quando $R_{th} = 1$, o limite de trip deve ser igual a SF^2 .

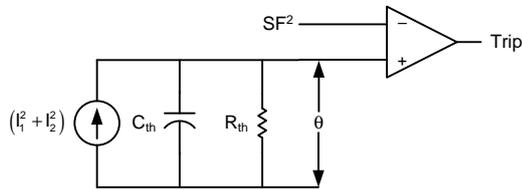


Fig. 10 Modelo térmico de operação do estator

D. Modelo Térmico Dependente do Escorregamento

A referência [7] deduz uma expressão para a resistência do rotor dependente do escorregamento [$R_r(S)$] em termos da resistência máxima do rotor (R_M), que ocorre em uma condição de paralização ("standstill" ($S = 1$)), e a resistência normal do rotor (R_N), que ocorre na velocidade nominal do motor ($S =$ escorregamento nominal). Esta expressão é mostrada em (3):

$$R_r(S) = (R_M - R_N) \cdot S + R_N \quad (3)$$

A Fig. 11 mostra a resistência do rotor durante a partida.

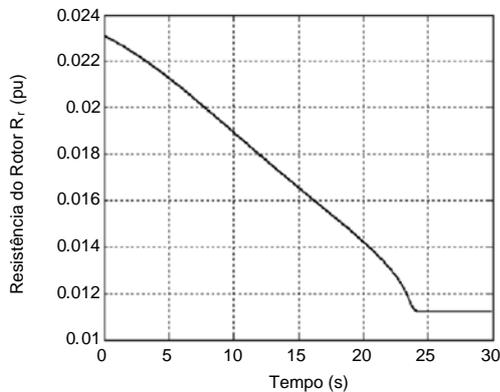


Fig. 11 Resistência do rotor durante a partida

Os valores em pu da resistência máxima do rotor (R_M) e resistência normal do rotor (R_N) podem ser calculados usando (4) e (5) [8].

$$R_M = T_{LR} \cdot \frac{S_{LR}}{I_{LRA}^2} \quad (4)$$

onde:

T_{LR} é o torque com rotor travado em pu.

S_{LR} é o escorregamento na condição de rotor travado = 1.

I_{LRA} é a corrente de rotor travado em pu.

$$R_N = T_N \cdot \frac{S_N}{I_{FLA}^2} \quad (5)$$

onde:

T_N é o torque nominal em pu.

S_N é o escorregamento na velocidade nominal.

I_{FLA} é a corrente nominal do motor em pu.

Para estabelecer o modelo térmico dependente do escorregamento, é necessário incorporar a resistência do rotor dependente do escorregamento dentro da fonte de calor do modelo térmico mostrado na Fig. 7.

Expressando o valor da resistência dependente do escorregamento $R_r(S)$ em termos de seu valor máximo (R_M) e substituindo este valor na equação da fonte de calor fornece (6):

$$W = I^2 \cdot r = I^2 \cdot \frac{R_r(S)}{R_M} \quad (6)$$

Decompondo (6) em componentes de sequência-positiva (R_{r1}) e sequência-negativa (R_{r2}) permite acomodar o aquecimento do motor causado pela corrente equilibrada (sequência-positiva) e qualquer desequilíbrio de corrente (sequência-negativa) que esteja presente.

A substituição da fonte de calor da Fig. 7 por (7) fornece o modelo térmico dependente do escorregamento mostrado na Fig. 12.

$$W_{TOTAL} = I_1^2 \cdot \frac{R_{r1}(S)}{R_M} + I_2^2 \cdot \frac{R_{r2}(S)}{R_M} \quad (7)$$

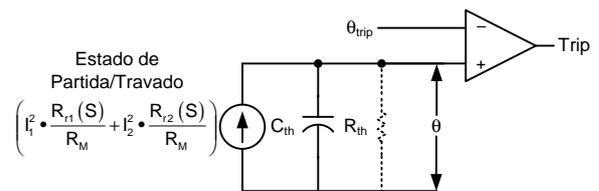


Fig. 12 Modelo térmico dependente do escorregamento

E. Partida com Inércia Elevada

Na partida com inércia elevada, o tempo para acelerar um motor até sua velocidade nominal é igual ou maior do que seu limite de tempo com rotor travado. Cargas de alta inércia, tais como ventiladores de tiragem induzida ("induced-draft fans"), exigem longos tempos de aceleração e podem exceder o limite térmico com rotor travado permitido. Partidas prolongadas são permitidas com segurança em algumas situações porque a resistência do rotor $R_r(S)$ é uma função do escorregamento e diminui à medida que o motor acelera.

A corrente de partida de um motor de indução no início da partida é quase igual à magnitude de corrente com rotor travado, mas tem um efeito de aquecimento menor durante a partida porque a resistência do rotor diminui à medida que o motor acelera até a velocidade nominal.

A Fig. 13 exibe uma comparação da curva de resposta do elemento de partida I^2t convencional com a curva de resposta do elemento de partida dependente do escorregamento. A comparação mostra claramente que, como a resistência do rotor decresce à medida que o motor acelera, a temperatura do rotor não é uma relação linear. Isto fornece capacidade para facilitar partidas de alta inércia sem ocorrência de trip prematuro do motor.

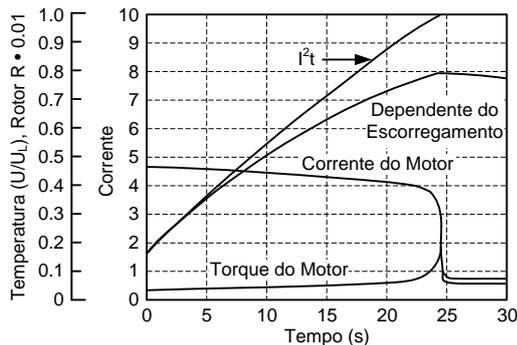


Fig. 13 Comparação das curvas de resposta do elemento de partida

III. DETECÇÃO DE BARRAS ROMPIDAS NO ROTOR

A detecção de uma barra rompida no rotor assim que ela ocorre é essencial para minimizar os danos e reduzir o tempo e o custo de reparo do motor. De acordo com [2], a condição de barra rompida resulta de estresses mecânicos e térmicos que levam a uma ruptura na junção entre a barra do rotor e o anel de extremidade.

Para detectar uma condição de barra rompida, a análise da assinatura da corrente do motor (MCSA) pode ser aplicada [9] [10]. Neste método, o espectro de frequência da corrente do estator é calculado e analisado para verificar se as bandas laterais superior e inferior (isto é, $[1 \pm 2S]f_0$, onde f_0 é a frequência nominal) estão presentes na corrente do estator, indicando que o rotor possui barras rompidas. A magnitude das bandas laterais é proporcional ao número de barras que estão rompidas.

A. Elemento de Detecção de Barra Rompida

A referência [2] descreve um elemento de detecção de barra rompida (BBDE: "Broken-Bar Detection Element") com zero ajustes. O algoritmo de BBDE é executado periodicamente para detectar uma condição de barra rompida. Ele é composto de três etapas: inicialização, coleta de dados e processamento de dados. Durante a etapa de inicialização, o algoritmo calcula uma nova corrente a partir das correntes de fase que não incluem a parcela que flui para a terra. Em seguida, ele registra a magnitude desta corrente e a frequência do sistema. Uma condição de operação do

motor é detectada durante a etapa de coleta de dados, utilizando estes valores como referência.

Durante a etapa de coleta de dados, o algoritmo eleva ao quadrado a corrente calculada na etapa de inicialização para desacoplar a frequência de interesse da frequência do sistema de potência e mover ambas as bandas laterais para a mesma frequência. Esta corrente ao quadrado também passa através de um filtro passa-baixa. Finalmente, o algoritmo armazena um conjunto de amostras consecutivas, referido como uma janela de amostras, em memória digital.

Durante a fase de processamento de dados, o algoritmo calcula a transformada rápida de Fourier dos dados da janela de amostras e, em seguida, calcula a magnitude associada a cada componente de frequência. Finalmente, as magnitudes médias dos componentes de frequência são comparadas com um valor limite do motor operando em perfeitas condições. A Figura 14 em [2] mostra os limites do espectro de frequência de um motor operando com 50% de carga e com uma barra rompida.

B. Resultados Experimentais

A referência [2] também apresenta alguns resultados experimentais do método descrito nesta seção usando barras rompidas de rotores reais. Para os testes experimentais, um motor sem defeito e motores com uma, duas ou três barras rompidas tiveram os espectros de frequência das respectivas correntes comparados durante a operação com 50% da carga nominal. Os resultados são mostrados na Figura 27 em [2]. Os valores dos picos das bandas laterais aumentam claramente à medida que o número de barras rompidas aumenta.

Diferentes condições de carga também foram testadas experimentalmente, e os resultados estão mostrados na Figura 28 em [2]. A frequência dos picos das bandas laterais diminui com a redução do nível de carga, e os picos tornam-se indetectáveis quando o motor está sem carga.

A referência [2] descreve como barras rompidas podem ser erroneamente detectadas durante oscilações de tensão da fonte de baixa frequência. Ela também recomenda algumas estratégias para diferenciar uma condição de barra rompida de uma oscilação de tensão (por exemplo, verificar se todos os motores conectados ao mesmo alimentador exibem o mesmo espectro de corrente, e medir a tensão mais distante do motor e mais próxima da fonte para confirmar a presença de componentes de baixa frequência na fonte de alimentação). Além disso, essas oscilações de tensão de baixa frequência podem não estar presentes no sistema o tempo todo. Elas geralmente aparecem quando o sistema está fortemente carregado ou com carga muito leve.

Oscilações de carga de baixa frequência podem gerar assinaturas de corrente similares àquelas de um motor com barras rompidas [2]. Um método para diferenciá-las consiste em aplicar um algoritmo que detecta a presença de um componente de frequência maior do que a normal, o qual pode indicar uma condição de barra rompida.

Para detectar condições de barra rompida do rotor em diferentes situações e monitorar como elas evoluem, o histórico de eventos e a função da transformada rápida de Fourier podem ser aplicados em conjunto. Isso torna possível diferenciar situações envolvendo fontes de tensão com componentes de baixa frequência e cargas oscilantes da condição de barra rompida.

IV. DETECÇÃO DE ARCO VOLTAICO

A aplicação da coordenação de tempo tradicional para sistemas industriais, tais como centros de controle de motores (CCMs), pode levar a elevados tempos de eliminação de faltas. Os tempos de eliminação de faltas são tipicamente entre 0.5 e 1.0 segundo. No entanto, a corrente de falta elevada em combinação com altos tempos de eliminação da falta causa valores extremamente elevados da energia do arco voltaico, que é uma situação altamente indesejável [11]. Portanto, o objetivo é reduzir o tempo de eliminação da falta para reduzir a energia do arco voltaico.

Uma opção para reduzir a energia do arco voltaico em subestações radiais consiste em aplicar um esquema de bloqueio com intertravamento de zonas simples e econômico, às vezes denominado esquema de trip de barras rápido. Este esquema fornece tempos de eliminação de faltas relativamente de alta velocidade para barras que não possuem proteção diferencial. Ao invés de depender de um intervalo de coordenação tradicional no relé principal da barra, este esquema requer apenas uma pequena temporização para permitir que os relés dos alimentadores bloqueiem o relé principal da barra para uma falta externa à barra. O esquema pode operar para faltas na barra em aproximadamente 2 a 3 ciclos.

A Fig. 14 mostra um relatório de evento de uma falta real em uma barra de 480 V com um arco voltaico. A falta começou como uma falta fase-terra (SLG: "single-line-to-ground") na fase B. Após 1 ciclo, ela evoluiu para uma falta trifásica com um aumento considerável do nível da corrente de falta. Mesmo em sistemas aterrados através de impedância que têm baixos níveis

de corrente para faltas SLG, tais faltas representam um alto risco em termos de arco voltaico devido à evolução da falta.

Outra observação interessante sobre a Fig. 14 é o fato de que a corrente de falta não é uma onda senoidal pura na frequência fundamental. Isso ocorre porque a resistência do arco não é constante, desempenhando um papel importante nos sistemas de baixa tensão. Os relés de sobrecorrente que operam com base nos componentes fundamentais calculam um valor incorretamente baixo para a corrente de falta, que pode comprometer o trip do elemento de sobrecorrente instantâneo.

O método mais eficaz para reduzir os tempos de eliminação de faltas consiste em aplicar a proteção de arco voltaico com sensores de luz combinados com elementos de sobrecorrente rápidos. Alguns relés numéricos modernos de proteção de motor incorporaram a detecção de arco voltaico e suportam a conexão de múltiplos sensores.

A finalidade da detecção de arcos voltaicos consiste em acelerar as decisões para dar trip com precisão no disjuntor e interromper a falta. A detecção de arco voltaico em um relé de proteção minimiza o tempo de trip, bem como o custo e a complexidade. A habilitação de detecção de arco no relé permite utilizar o monitoramento da corrente e a proteção já existente no circuito.

Os sensores de detecção de arco voltaico fornecem uma medição clara de um arco voltaico porque a luz emitida durante um evento de arco voltaico é significativamente mais brilhante do que a luz de fundo normal existente na subestação. Também é possível supervisionar sua operação com um elemento de sobrecorrente rápido, conforme discutido posteriormente nesta seção. A onda de luz é visível a partir do início do arco e é facilmente detectada usando tecnologia comprovada. Os sensores mais comuns são sensores de lente pontuais e sensores de fibra óptica descoberta.

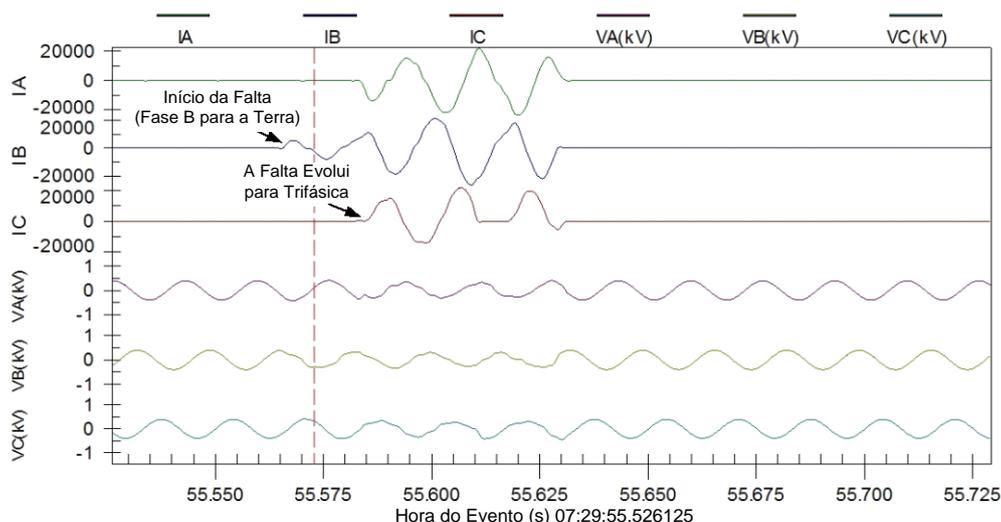


Fig. 14 Relatório de evento de uma falta real em uma barra de 480 V com um arco voltaico

A luz é transmitida a partir do sensor até o detector localizado no relé de proteção. O monitoramento da integridade do sistema é realizado usando um *loop* de fibra óptica. No caso dos sensores de lentes pontuais (ver Fig. 15), cada lente tem uma conexão de entrada e uma conexão de saída. A entrada é conectada a um transmissor no relé, e a saída é conectada a um detector no relé. Esta conexão em *loop* permite testes periódicos do sistema com injeção de luz a partir do transmissor através do *loop* e de volta para o detector. Este sistema de conexão em *loop* funciona tanto com um sensor de lente pontual quanto com um sensor de fibra óptica descoberta.



Fig. 15 Sensor de lente pontual

Um sensor de fibra óptica descoberta consiste de um cabo de fibra óptica de plástico de alta qualidade sem revestimento (ver Fig. 16). O cabo de fibra óptica transparente torna-se uma lente que captura a luz da área. O uso de um sensor de fibra óptica descoberta torna possível a detecção de arcos voltaicos em áreas amplas com apenas um sensor.

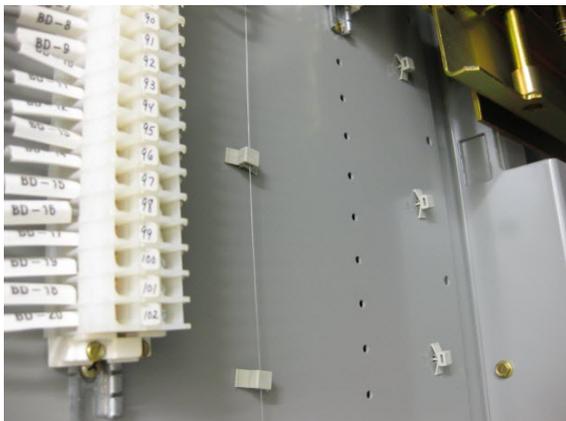


Fig. 16 Cabo de fibra óptica descoberta

Sistemas de detecção de arco voltaico normalmente usam uma combinação de sensores de lente pontuais e fibra óptica descoberta. A instalação adequada dos sensores e relés fornece pontos para lógicas de detecção e trip em qualquer sistema.

Os sensores devem ser localizados onde a detecção de arco voltaico pode emitir um sinal de trip no disjuntor a montante correspondente. Usando múltiplos sensores e incluindo relés do motor e alimentador que suportam conexões de sensores de luz, como mostrado na Fig. 17, este sistema fornece 100% de cobertura para proteção de arco voltaico, operando em aproximadamente 2 a 3 ms.

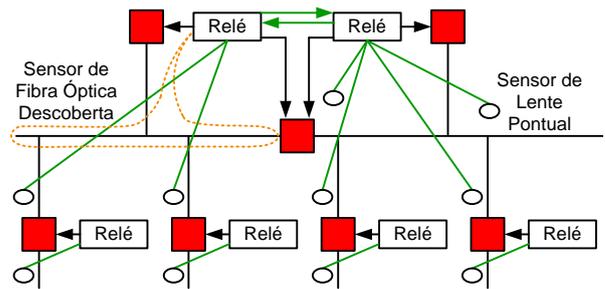


Fig. 17 Sistema típico de detecção de arco voltaico com sensores e comunicação entre relés

A instalação de sensores varia dependendo do fabricante do cubículo, tipo de equipamento e número de seções. Múltiplas entradas dos sensores fornecem opções de cobertura e seccionamento. Um sensor de fibra óptica descoberta pode fornecer excelente cobertura para uma seção de barra completa. Os sensores de lentes pontuais fornecem melhor detecção em pequenos espaços confinados.

Um obstáculo associado ao uso de sensores de luz é a necessidade de medir e ajustar em função de variação nos níveis de luz ambiente. Os relés armazenam as medições analógicas dos valores de luz e corrente. Os usuários podem visualizar estas medições e ajustar os níveis normais de luz para a aplicação. Os relatórios de evento do relé também fornecem uma ferramenta de comissionamento e solução de problemas através de eventos com estampas de tempo, incluindo os níveis de luz do sensor.

Para adicionar segurança a um esquema de detecção de arco voltaico, um elemento de sobrecorrente de alta velocidade pode ser aplicado em conjunto com os sensores de luz, como mostrado na Fig. 18, sem sacrificar as velocidades de trip. O elemento de sobrecorrente de alta velocidade é baseado em amostras brutas para evitar os elevados atrasos da filtragem. A vantagem adicional do processamento da detecção de arco voltaico no relé de proteção é a capacidade de usar uma medição de sobrecorrente real como um elemento de supervisão para melhorar a segurança. O ajuste do nível de corrente abaixo da carga normalmente esperada habilita o detector de arco voltaico como o mecanismo de trip e remove qualquer atraso de tempo; no entanto, isto sacrifica a segurança e torna o sistema dependente apenas da detecção de luz e precisa ser evitado.

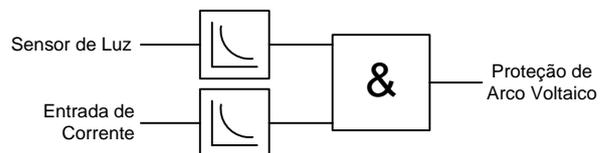


Fig. 18 Detecção de luz em combinação com elemento de sobrecorrente de alta velocidade

V. CONCLUSÕES

A proteção do motor é enormemente aprimorada através de relés numéricos. Os motores de indução exigem proteção térmica para evitar sobreaquecimento para sobrecargas tanto cíclicas quanto em regime.

O aumento de calor em um motor causado por $I^2 \cdot R$ watts é um processo de primeira ordem que pode ser representado por um modelo térmico de primeira ordem, o qual pode ser usado por um relé de motor para calcular continuamente a temperatura em tempo real. A temperatura calculada é monitorada para evitar o sobreaquecimento.

O modelo térmico dependente do escorregamento rastreia a temperatura do motor com mais precisão do que o modelo I^2t , facilitando assim as partidas de alta inércia sem o uso de chaves de velocidade ("speed switches").

Os algoritmos de BBDE que utilizam MCSA nos modernos relés numéricos de motor, em conjunto com o histórico de eventos e a função da transformada rápida de Fourier, permitem a detecção de barras rompidas do rotor para uma ampla variedade de condições do motor. O elemento de detecção identifica os casos mais comuns de barras rompidas. O histórico de eventos registra e torna possível uma análise mais precisa sobre quando os problemas começam e como eles evoluem.

Os arcos voltaicos representam um perigo claro para as equipes de trabalho. A segurança do trabalhador deve estar sempre na vanguarda dos projetos, processos e procedimentos. A adição de detecção de arco voltaico melhora a segurança das instalações. Os sistemas de detecção de arco voltaico podem ser projetados nos cubículos novos ou submetidos a *retrofit* nos equipamentos existentes. A segurança dos sistemas de detecção de arco voltaico pode ser aumentada através da combinação dos sistemas de detecção de luz e sobrecorrente.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] T. Fleiter, W. Eichhammer, and J. Schleich, "Energy Efficiency in Electric Motor Systems: Technical Potentials and Policy Approaches for Developing Countries," United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria, November 2011. Available: <https://www.unido.org>.
- [2] C. Pezzani, P. Donolo, G. Bossio, M. Donolo, A. Guzmán, and S. E. Zocholl, "Detecting Broken Rotor Bars With Zero-Setting Protection," proceedings of the 48th Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, Louisville, KY, May 2012.
- [3] T. E. Neal and R. B. Hirschmann, "The Myths and Realities of Arc Flash Protection," *Electric Energy Magazine*, May/June 2004.
- [4] P. Whatley, M. Lanier, L. Underwood, and S. Zocholl, "Enhanced Motor Protection With the Slip-Dependent Thermal Model: A Case Study," proceedings of the 34th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2007.
- [5] S. E. Zocholl, *AC Motor Protection*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, WA, 2003.
- [6] S. E. Zocholl, "Optimizing Motor Thermal Models," proceedings of the 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Philadelphia, PA, September 2006.
- [7] S. E. Zocholl and G. Benmouyal, "Using Thermal Limit Curves to Define Thermal Models of Induction Motors," proceedings of the 28th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2001.
- [8] S. E. Zocholl and E. O. Schweitzer, III, "Protection of Large Induction Motors – Practice vs. the Actual Model," proceedings of the 39th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, May 1985.
- [9] H. W. Penrose, *Electrical Motor Diagnostics*, 2nd ed. Success by Design, 2008.
- [10] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, and M. W. Madden, "Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 3, Issue 4, December 1988, pp. 873–879.
- [11] J. Buff and K. Zimmerman, "Application of Existing Technologies to Reduce Arc-Flash Hazards," proceedings of the 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2007.

VII. BIOGRAFIAS

Ricardo Abboud recebeu seu diploma (B.S.E.E.) em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, em 1992. Em 1993, ele começou a trabalhar na CPFL Energia como engenheiro de proteção. Em 2000, ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) como engenheiro de aplicação de campo do Brasil, auxiliando os clientes na área de proteção e automação de subestações. Em 2005, ele se tornou o Gerente de Engenharia de Campo e, em 2014, passou a ser o Gerente de Engenharia e Serviços. Em 2016, foi transferido para Pullman, Washington, EUA, e atualmente ocupa o cargo de Gerente Técnico Internacional. Ricardo Abboud é um instrutor certificado da Universidade SEL e é autor e coautor de diversos artigos técnicos.

ricardo_abboud@selinc.com

Dibyendu Bhattacharya recebeu seu diploma de engenharia elétrica com louvor ("first-class honours") pela *Jadavpur University*, Índia, em 1991. Ele trabalhou por 14 anos na divisão de refinarias da *Indian Oil Corporation Ltd.*, efetuando testes, comissionamento, solução de problemas e manutenção de equipamentos elétricos e sistemas de potência. Ele trabalhou para a *Kuwait National Petroleum Company*, bem como para a *Fluor Limited* e *KBR* como engenheiro líder de projetos de petróleo e gás, antes de ingressar na *BP*. Ele apresentou artigos na *PCIC London* e é coautor de um artigo técnico. É um engenheiro registrado ("Chartered Engineer") e um *Fellow* da *Institution of Engineering and Technology (IET)* do Reino Unido.

dibyendu.bhattacharya@uk.bp.com

Paulo Lima recebeu seu diploma (B.S.E.E.) pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Minas Gerais, Brasil, in 2012. Ele trabalha como engenheiro de aplicação de proteção na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. desde 2012, fornecendo suporte técnico para os clientes industriais do Brasil.

paulo_lima@selinc.com

John Needs recebeu seu diploma em física pela *University of Bath* em 1981 com ênfase em eletrônica física. Ele começou a trabalhar na *GEC Measurements* em 1982 como engenheiro de desenvolvimento, inicialmente na área de testes de tipo e, posteriormente, na programação de relés de distância. Em seguida, foi engenheiro de relés na *National Grid* e, mais tarde, ingressou na *Alstom*, primeiro como engenheiro de aplicação e, depois, como instrutor do departamento de treinamentos. Em 1998, o Sr. Needs ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., onde atualmente trabalha como Gerente Técnico Regional.

john_needs@selinc.com

Alejandro Rodriguez recebeu o diploma em engenharia elétrica e concluiu o mestrado (M.Sc.) pela *Universidad Metropolitana*, Venezuela, em 2006. Neste mesmo ano, ele começou a trabalhar na *Honeywell* em Caracas, Venezuela, como engenheiro júnior nas áreas de automação, programação e configuração de estratégias de controle e desenvolvimento de interface homem-máquina. Em 2009, foi para o *Gruppo Luccioni* em Angeli di Rosora, Itália, como engenheiro elétrico júnior nas áreas de sistemas de geração de potência e projeto de sistemas elétricos industriais. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2010 como engenheiro júnior e está atualmente trabalhando como engenheiro de aplicação de proteção em Eindhoven, Holanda. Ele é um engenheiro elétrico profissional licenciado.

alejandro_rodriguez@selinc.com