

Retrofit da Proteção de Motores: Um “Business Case”

Kyle Craig, *Ontario Power Generation*
Amy Sinclair, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Sumário—O estágio inicial de qualquer projeto consiste, frequentemente, no desenvolvimento de um caso de negócio (“business case”). Este artigo esboça o *business case* para o retrofit da proteção de motores de uma usina de geração térmica de grande porte. O artigo analisa as principais melhorias da proteção desta instalação, incluindo as vantagens do modelo térmico e a aplicação do modelo térmico dependente do escorregamento.

I. INTRODUÇÃO

A compreensão e a utilização das vantagens técnicas, além de outros recursos digitais extremamente importantes dos relés microprocessados, podem ser de grande ajuda durante o desenvolvimento de um caso de negócio (“business case”). Essas vantagens incluem a modelagem térmica avançada do aquecimento do motor, relatórios de evento, relatórios sequenciais de eventos, relatórios das partidas do motor, tendências das partidas do motor, estatísticas de operação do motor, recursos adicionais de proteção e funções de controle adicionais.

Este artigo analisa o *business case* para substituição da proteção eletromecânica dos motores de 4 kV, baseada na réplica térmica dos mesmos, e dos relés auxiliares de uma usina de geração térmica de 2,200 MW. Os relés da proteção original dos motores têm 35 anos; portanto, já ultrapassaram o respectivo tempo de vida útil esperado, são obsoletos, e têm peças sobressalentes limitadas. Reconhecemos que a probabilidade de uma falha da proteção de um motor é baixa; contudo, as consequências financeiras de uma interrupção causada por uma falha podem ser extremamente graves. Esta consequência financeira está relacionada aos danos aos equipamentos que podem ocorrer devido à falha da proteção e à subsequente compra de geração a um custo maior em função da indisponibilidade de um gerador.

O modelo térmico dependente do escorregamento é analisado rapidamente. Através de exemplos de aplicação, o trabalho detalha a proteção avançada desses motores, onde anteriormente a proteção era dessensibilizada para permitir a partida.

II. HISTÓRICO E PROBLEMAS

A barra de 4 kV mostrada na Fig. 1 é da Unidade 1 de quatro sistemas ancilares com unidades geradoras similares. A proteção dos motores é necessária para detectar condições anormais do motor e iniciar a remoção do mesmo de serviço, visando protegê-lo contra danos. Para esta usina de geração térmica, os motores críticos são: bombas *standby* para alimentação das caldeiras (“standby boiler feed pumps” – SBFPs), ventiladores de tiragem forçada (“forced draft fans” – FD fans), ventiladores de tiragem induzida (“induced draft fans” – ID fans), bombas de água de refrigeração do condensador (“condenser cooling water” – CCW pumps) no verão, e bombas de circulação da caldeira. Se a proteção estiver indisponível ou o motor estiver indisponível para qualquer um desses motores críticos, a unidade geradora correspondente estará indisponível ou operando com capacidade reduzida (“derated”) até que o problema seja resolvido.

A. Programação da Manutenção e Peças Sobressalentes

A proteção eletromecânica dos motores baseada na réplica térmica dos mesmos e os relés auxiliares existentes estão bem além dos respectivos tempos de vida útil, são obsoletos sob a perspectiva de fabricação, e possuem peças sobressalentes limitadas. Os requisitos da usina para manutenção desses equipamentos existentes consistem na realização de testes funcionais completos e calibração a cada cinco anos. Historicamente, a calibração de um único esquema de relés auxiliares e proteção de motor baseada na réplica térmica do mesmo leva um dia inteiro. Há um total de 90 esquemas de proteção de motores dentro da instalação.

Os novos relés digitais incorporam a função de autodiagnose e não requerem a mesma extensão de testes funcionais e de calibração. Os relés digitais são capazes de registrar e armazenar relatórios de evento, dados dos relatórios sequenciais de eventos, relatórios das partidas do motor, tendências das partidas do motor e estatísticas de operação do motor, assim como gerar alarme para falhas detectadas pela autodiagnose. Os relés digitais estão constantemente reportando o respectivo estado. Testes funcionais somente são requeridos após a conclusão do comissionamento inicial para entrada em operação. Estes testes funcionais levam menos de 30 minutos. O ciclo de testes funcionais do relé digital corresponde aos requisitos atuais do NPCC (“Northeast Power Coordinating Council”) para reverificação de relés digitais.

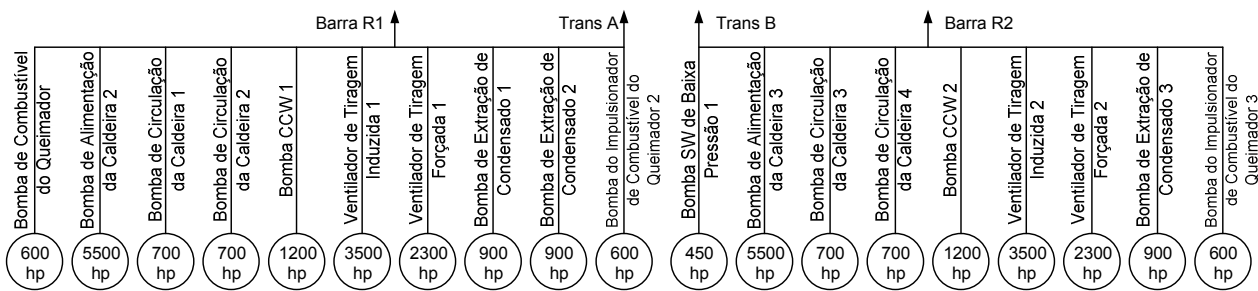


Fig. 1. Diagrama Unifilar Simplificado da Unidade 1 de 4.16 kV

B. Silver Migration

As caixas dos relés auxiliares existentes nos painéis de proteção de motores comprovaram ser susceptíveis à ocorrência de migração da prata (“silver migration”). “Silver migration” consiste no movimento iônico da prata entre dois potenciais. A umidade presente no ar da usina térmica atua como um eletrólito. A prata é transferida dos contatos de um relé auxiliar para os terminais de sua caixa de montagem. Se a migração da prata provocar a conexão de dois terminais, há probabilidade de ocorrer falhas da proteção. A usina registrou diversos trips falsos durante os últimos anos. A operação mais recente causada pela *silver migration* ocorreu em fevereiro de 2007.

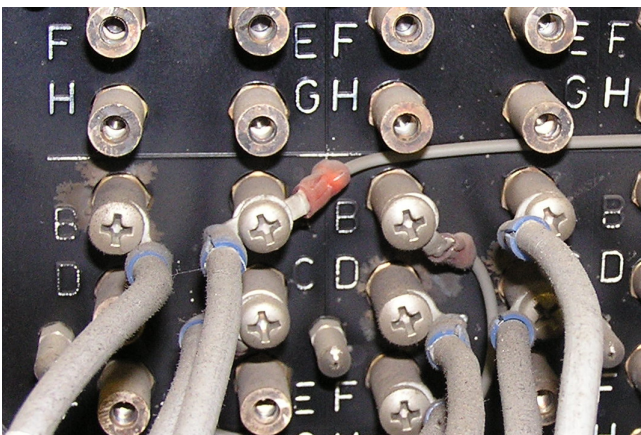


Fig. 2. Caixa de Relés Auxiliares Mostrando Silver Migration

Atualmente, há um programa básico aprovado para substituir essas caixas de relés auxiliares que são susceptíveis à ocorrência de *silver migration* nos esquemas de proteção de transformadores e barra de 4 kV do gerador. A programação existente inclui a substituição de todas as caixas de relés auxiliares de 90 esquemas de proteção de motores da usina. O custo de uma caixa nova é de aproximadamente 600 dólares canadenses e o tempo para substituição de uma caixa é de dois dias de trabalho. A execução deste programa de substituição das caixas dos relés auxiliares está programada para os próximos cinco anos. Para os 90 esquemas de proteção de motores, isso representa 180 dias e 54,000 dólares canadenses ao longo dos próximos cinco anos.

Os novos relés digitais possuem temporizadores internos, selos internos (“latches”), entradas digitais e contatos de saída

suficientes para que os relés auxiliares e as caixas dos relés auxiliares não sejam mais necessários.

C. Dados e Registros Digitais

Atualmente, a usina não tem equipamentos para registros digitais das faltas nos motores de 4 kV ou barra de 4 kV. Os novos relés digitais de proteção de motores efetuam a amostragem e o armazenamento dos dados analógicos e digitais. Isso fornece os dados de operação necessários para determinar rapidamente a causa do trip sem efetuar todos os testes detalhados que eram requeridos anteriormente para solução de problemas para todos os trips da proteção de motores. Após um trip da proteção do motor proveniente da proteção eletromecânica existente, havia um requisito para efetuar o teste funcional da proteção. Com os dados digitais armazenados pelos novos relés digitais, isto não é mais uma exigência. Os novos relés digitais também fornecem relatórios estatísticos da operação do motor e relatórios das tendências do motor. Esses arquivos podem ser usados para fornecer um alerta inicial sobre variações na corrente de partida do motor, capacidade térmica usada (“thermal capacity used” – TCU) durante a partida e tempo de partida do motor. Como exemplo, esses tipos de dados detalhados podem indicar um aumento gradual do torque de carga, que pode levar a um trip não desejado do rotor. A análise desses tipos de dados pode ajudar no planejamento da programação da manutenção do motor, bem como evitar interrupções não programadas.

D. Modelo Térmico e Resfriamento do Motor

A proteção do motor existente depende dos operadores e procedimentos de operação para determinar o tempo correto entre as partidas e evitar danos aos motores causados por múltiplas e frequentes partidas dos mesmos. Os novos relés digitais incorporam uma função de bloqueio para evitar a partida do motor até que o elemento térmico tenha calculado se existe capacidade térmica disponível suficiente para permitir uma partida sem dar trip. O engenheiro de proteção ajusta a capacidade térmica do estator e rotor usada durante a partida, e o relé fornece um bloqueio até que o motor tenha sido refrigerado de acordo com a capacidade definida.

E. Cargas com Inércia Elevada

Os motores SBFP e os “FD fan” possuem, cada um, tempos de partida consideravelmente maiores do que os respectivos tempos seguros para perda de velocidade (“safe stall time”). Os relés de proteção eletromecânicos existentes

baseados na réplica térmica do motor têm sido desenhados para acomodar os tempos longos de partida. No passado, a usina usava chaves de velocidade; ao longo do tempo, contudo, essas chaves de velocidade provaram não ser confiáveis e foram retiradas. A probabilidade de um motor perder velocidade é baixa, mas a consequência de uma falha é muito grave. A falha de um motor “FD fan” vai causar uma redução forçada da capacidade para metade da carga até que o motor seja reparado. O reparo deste motor de 2,300 hp pode levar de uma semana a três meses, dependendo da gravidade dos danos sofridos pelo motor. Uma falha do motor SBFP não resultará numa interrupção forçada da unidade desde que o outro SBFP para tal gerador esteja disponível. Se ambos os motores SBFP estiverem indisponíveis, o gerador terá uma

interrupção forçada até que o motor seja reparado ou que seja disponibilizada uma unidade sobressalente. O reparo ou a substituição deste motor de 5,500 hp pode levar de uma semana até três meses.

O relé digital para este retrofit da proteção do motor calcula o escorregamento do motor baseado na corrente e tensão medidas. O relé usa o escorregamento calculado para computar a resistência de sequência-positiva e negativa do rotor durante a partida do motor. Este cálculo da resistência do rotor reflete o aquecimento do motor durante uma partida e fornece um tempo maior de aceleração antes da ocorrência do trip, quando comparado ao valor permitido no modelo do rotor baseado em I^2t .

TABELA I
ALTERNATIVAS E ANÁLISE ECONÔMICA (EM DÓLARES CANADENSES)

	Caso Base	Alternativa 1 (Parcial)	Alternativa 2 (Adiar)	Alternativa 3 (Recomendada)
Custo do Projeto	104,000	250,000	430,000	400,000
Valor Presente Líquido	49,614	137,568	231,530	215,437
Impacto no Valor Econômico		87,954	181,916	165,823

III. ALTERNATIVAS E ANÁLISE ECONÔMICA

A. Caso Base

O caso base considerado neste *business case* consiste no estado atual (“status quo”). Este projeto pode levar à falha de um motor crítico (ventiladores de tiragem forçada, bombas para alimentação de caldeiras, bombas de água de refrigeração do condensador durante a operação no verão, ou bombas de circulação da caldeira), que pode causar a indisponibilidade ou perda da capacidade da unidade principal por um período de um dia até três meses, dependendo da gravidade da falha. Embora o risco de uma falha seja pequeno, as consequências de uma falha são graves.

O tempo de manutenção necessário para calibração, solução de problemas e testes desses esquemas de proteção de motores de 35 anos de idade somente continuará a aumentar à medida que eles continuam a envelhecer.

Esta opção ainda custará 104,000 dólares canadenses ao longo dos próximos cinco anos para substituição das caixas dos relés auxiliares de acordo com o programa existente. Como não é prático ou possível substituir todas as caixas de relés auxiliares ao mesmo tempo, a ocorrência de trips não desejados dos motores devido à *silver migration* pode ser um problema. Todos os custos associados a esta alternativa são evitados por meio do *upgrade* de todos os esquemas de proteção de motores de 4 kV.

B. Alternativa 1: Upgrade da Proteção dos Motores de 4 kV Somente nos Motores Críticos

Esta opção vai envolver e tratar da disponibilidade de peças sobressalentes, problemas de confiabilidade do sistema e o problema da *silver migration* em metade dos esquemas de proteção de motores. Esta alternativa introduzirá duas

tecnologias separadas para a proteção dos motores de 4 kV, o que não é recomendado. As caixas de relés auxiliares dos esquemas de proteção de motores que não forem alterados ainda terão que ser substituídas conforme planejado. Considerando que os esquemas originais da proteção de motores de 35 anos de idade mantidos para os motores não críticos continuarão a envelhecer (muito além do respectivo tempo de vida útil esperado), mais falhas vão ocorrer. Embora essas falhas não afetem a disponibilidade de uma unidade geradora, as falhas na proteção de motores podem causar danos de alto custo aos motores; isso vai, no final das contas, requerer o *upgrade* dos relés.

C. Alternativa 2: Adiar o Trabalho em Um Ano

O adiamento do projeto significa não atacar imediatamente a questão da disponibilidade das peças sobressalentes e confiabilidade do sistema. A frequência da solução de problemas e calibração da proteção de motores para verificar a operação correta somente aumentará à medida que os equipamentos continuam a envelhecer. De forma similar ao caso base, adiar o projeto vai aumentar a probabilidade de uma interrupção forçada ou danos aos equipamentos. A probabilidade de ocorrer trips não desejados em função da *silver migration* somente aumenta com o tempo.

D. Alternativa 3: Upgrade da Proteção dos Motores de 4 kV

A proposta recomendada e aceita consiste em substituir todos os relés de proteção dos motores de 4 kV e caixas de relés auxiliares existentes por novos relés digitais que atendam aos requisitos da proteção de motores.

Os novos relés de proteção fornecem o seguinte:

- Proteção para motores com tempos de partida maiores do que seu tempo seguro para perda de velocidade.

- Bloqueio térmico pela proteção para múltiplas partidas.
- Proteção avançada para motores protegidos previamente com elementos 51.
- Aquisição de dados e solução de problemas usando os dados digitais armazenados no relé.

As fotos da Fig. 3 mostram a instalação dos relés digitais. Os custos de instalação foram mantidos a um nível mínimo, obtendo vantagens da fiação existente. As fotos mostram que, de forma geral, apenas a fiação interna do painel exigiu modificações.



Fig. 3. Retrofit da Proteção de Motores

IV. PARTIDA DO MOTOR E CÁLCULO DO ESCORREGAMENTO DO MOTOR

A maioria dos relés digitais de proteção de motores calcula o aquecimento medindo a corrente. O relé calcula o aquecimento em termos da capacidade térmica. A capacidade térmica é definida de forma que o valor 0% indique um motor completamente refrigerado e 100% represente o valor limite. A capacidade térmica é acumulada baseando-se na corrente medida; durante a partida do motor, a proteção é essencialmente um elemento I^2t , com o tempo máximo de partida limitado pelo tempo seguro do limite térmico do motor para perda de velocidade. Problemas aparecem na partida de motores com cargas de inércia elevada, uma vez que o tempo requerido para partir o motor pode se aproximar ou até ultrapassar o tempo seguro do limite de aquecimento por perda de velocidade [1].

O relé usado para este retrofit utiliza um modelo térmico que calcula o escorregamento do motor durante a partida. Durante a partida de um motor de indução, a resistência do

rotor varia a partir de um valor alto com rotor travado até um valor baixo de operação. Este relé de proteção de motores usa tensão e corrente para calcular a resistência do rotor dependente do escorregamento que possibilita o cálculo da temperatura do rotor enquanto ela varia durante uma partida do motor. Os detalhes deste modelo térmico podem ser analisados em [2].

Em resumo, quatro grandezas são requeridas pelo modelo térmico dependente do escorregamento para calcular a resistência do rotor travado e a resistência do rotor para velocidade nominal. Essas quatro grandezas são: torque do rotor travado (“locked rotor torque” – LRQ), corrente do rotor travado em p.u. (I_L), velocidade a plena carga ($FL\omega$) e velocidade síncrona ($Syn\omega$).

A resistência do rotor travado, R_M , é calculada diretamente a partir de LRQ em p.u. do torque nominal e a corrente do rotor travado em corrente em p.u.

$$\text{Resistência do Rotor Travado } R_M = \frac{LRQ}{I_L^2} \quad (1)$$

A resistência do rotor para velocidade nominal, R_N , é calculada diretamente a partir de $FL\omega$ e $Syn\omega$. A resistência do rotor para velocidade nominal é o escorregamento a plena carga do motor (“full-load slip” – FLS).

Resistência do Rotor para Velocidade Nominal

$$R_N = 1 - \frac{FL\omega}{Syn\omega} \quad (2)$$

No instante da partida do motor, o relé calcula a resistência do motor por meio da amostragem da tensão de sequência-positiva $V_1(\text{cyc})$ e corrente de sequência-positiva $I_1(\text{cyc})$ no ciclo inicial selecionado. A parte real desta impedância é a resistência inicial do motor, R_p .

$$\text{Resistência Inicial do Motor } R_p = \text{real} \left(\frac{V_1(\text{cyc})}{I_1(\text{cyc})} \right) \quad (3)$$

Agora, com um valor amostrado de R_p e a resistência do rotor travado, R_M , a resistência do estator pode ser calculada, onde $A = 1.2$, uma constante mostrada em [2].

$$\text{Resistência do Estator } R_s = R_p - \frac{R_M}{A} \quad (4)$$

O escorregamento, mostrado em (6), é uma função da variação da resistência de entrada do motor, mostrada em (5), da resistência do rotor travado calculada previamente, R_M , da resistência do rotor para velocidade nominal, R_N , e da resistência do estator, R_s . A resistência de entrada do motor é medida e atualizada a cada intervalo de processamento. O escorregamento do motor é calculado a cada 2 ciclos.

$$\text{Resistência do Motor } R = \text{real} \left(\frac{V_1}{I_1} \right) \quad (5)$$

$$\text{Escorregamento do Motor } S = \frac{R_N}{A(R - R_s) - (R_M - R_N)} \quad (6)$$

Resistência do Rotor de Sequência-Positiva

$$R_1 = (R_M - R_N)S + R_N \quad (7)$$

Uma comparação do elemento de partida I^2t padrão, que assume uma resistência do rotor constante, com o elemento de partida dependente do escorregamento mostra que o modelo dependente do escorregamento simplesmente inclui a resistência do rotor dependente do escorregamento na fonte de calor do modelo térmico [2] [3].

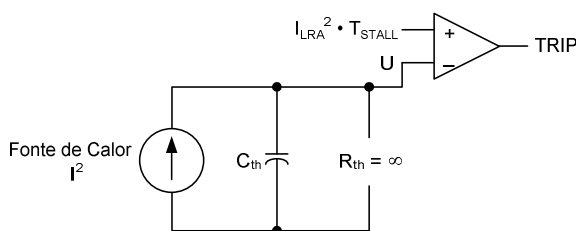


Fig. 4. Elemento de Partida I^2t do Rotor

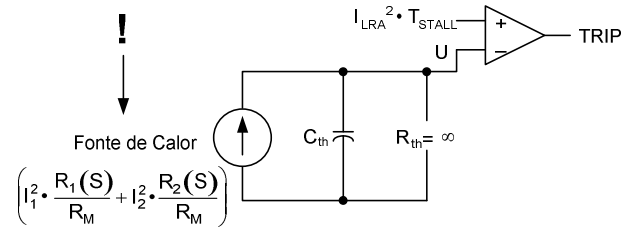


Fig. 5. Elemento de Partida Dependente do Escorregamento

Observe que a resistência térmica do rotor durante a partida é infinita. A partida transfere uma grande quantidade de calor para as barras do rotor. O tempo para partir é muito menor do que as constantes de tempo térmicas do motor. A conclusão é que o calor transferido para o rotor não começará a ser transferido para o ambiente adjacente até que o processo de partida tenha sido concluído.

A. Exemplo 1: Bomba Standby para Alimentação de Caldeiras de 5,500 hp

Os dados seguintes estavam disponíveis para este motor de 4 kV, 5,500 hp:

- Corrente a plena carga (“Full-load amperes” – FLA) = 685 A
- Corrente do rotor travado = $4.82 \cdot FLA$
- Fator de serviço (“Service factor” – SF) = 1.05
- Rotações por minuto (rpm) para carga nominal (velocidade nominal) = $nr = 3,565$ rpm
- $LRQ = 0.96 \cdot \text{torque nominal}$
- Tempo seguro para perda de velocidade = 5.3 segundos @ 100% tensão nominal
- Tempo seguro para perda de velocidade = 6.8 segundos @ 90% tensão nominal
- Tempo seguro para perda de velocidade = 9.0 segundos @ 80% tensão nominal
- Tensão = 4,000 V

Essas informações forneceram a maioria dos dados necessários para calcular os ajustes do relé digital. FLA foi ajustada em 685 A. O ajuste da corrente do rotor travado foi aumentado de $4.82 \cdot FLA$ para $5.5 \cdot FLA$ (um aumento de aproximadamente 300 A), conforme sugerido pela empresa que reforçou (“rebarred”) o rotor para obter uma barra com maior condutividade. O estator não foi modificado. SF foi ajustado em 1.05 de acordo com as características nominais do motor. FLS foi calculado como: $(FLS = 1 - nr/ns)$ ($FLS = 1 - 3565/3600 = 0.0097$). O tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade foi ajustado de forma conservadora em 9.0 segundos.

Os ajustes seguintes foram aplicados ao relé:

```
RID := UNIT 4 SBFP2
TID := 4-532-CB-A5
CTRL := 800 FLA1 := 685.0 E2SPEED := N CTRN := 100
PTR := 35.00 VNOM := 4160 DELTA_Y := WYE SINGLEV := N
E49MOTOR := Y FLS := 0.0097 LRQ := 0.96 49RSTP := 91
SF := 1.05 LRA1 := 5.5 LRTHOT1 := 9.0 RTC1 := AUTO
```

A Fig. 6 exibe o relatório de partida do motor para este SBFP de 5,500 hp. As linhas mostram a corrente do motor, tensão nos terminais, temperatura do rotor em p.u. do valor de trip ou capacidade térmica, e escorregamento.

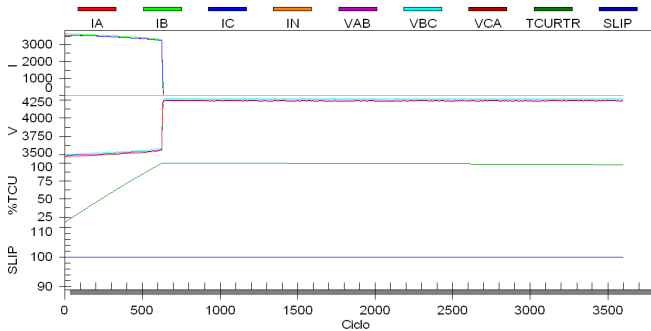


Fig. 6. Relatório de Partida do Motor SBFP, LRQ = 0.96

A Fig. 6 mostra que o escorregamento (“slip”) foi mantido em 1.0 durante toda a partida. Devido à carga com inércia elevada, o tempo de partida do motor é maior do que o tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade, e a capacidade térmica atinge 100%. Quando o escorregamento calculado ultrapassar 1, o relé fixa um escorregamento igual a 1 e calcula a elevação da temperatura usando a alta resistência do rotor travado. Após uma análise dos dados de partida do motor, o fabricante do motor sugeriu um valor revisado de LRQ de 0.7 por unidade do torque nominal e um tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade de 6.5 segundos.

Os ajustes seguintes foram aplicados ao relé:

```
RID := UNIT 4 SBFP2
TID := 4-532-CB-A5
CTRL := 800 FLA1 := 685.0 E2SPEED := N CTRN := 100
PTR := 35.00 VNOM := 4160 DELTA_Y := WYE SINGLEV := N
E4SMOTOR := Y FLS := 0.0097 LRQ := 0.70 49RSTP := 91
SF := 1.05 LRA1 := 5.5 LRTHOT1 := 8.0 RTC1 := AUTO
```

Os ajustes aplicados usaram um tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade que era mais conservador do que o valor sugerido de 8.0 segundos. A Fig. 7 exibe o relatório de partida para os ajustes revisados. Durante a partida com duração de 11 segundos, a temperatura do rotor atinge 75% da máxima temperatura permitida. A grandeza revisada LRQ resulta em uma nova constante armazenada para a resistência do rotor travado, R_M , (1) e também resulta num valor calculado revisado de R_S (4). A resistência do estator, R_S , é dependente de R_M e R_P , conforme (3). O relé mede e calcula R_S durante cada partida.

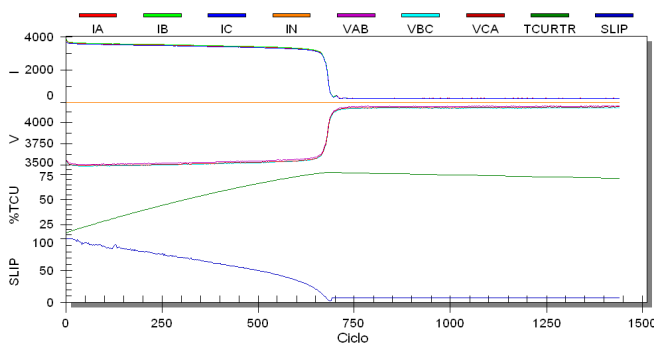


Fig. 7. Relatório de Partida do Motor SBFP, LRQ = 0.7, Partida 1

O motor foi partido mais duas vezes com LRQ em 0.7 e tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade igual a 8.0 segundos. A Fig. 8 mostra um relatório

de partida do motor para a Partida 3 do SBFP de 5,500 hp com os ajustes revisados. Observe que nesta partida repetida, as linhas mostram a corrente normal do motor e a tensão nos terminais do relé. Neste caso, contudo, o escorregamento calculado permanece em 1 por um tempo estendido. A resistência do rotor permanece em RM por este tempo, e a capacidade térmica atinge 100%.

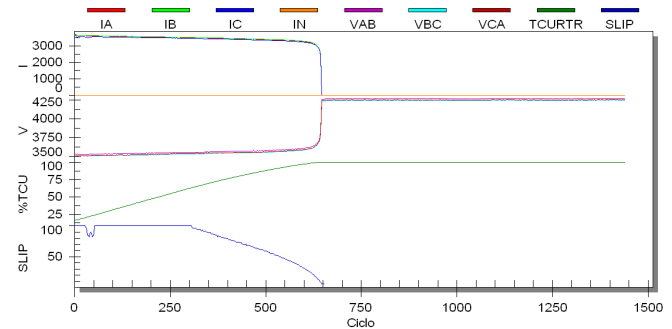


Fig. 8. Relatório de Partida do Motor SBFP, LRQ = 0.7, Partida 3

Uma análise detalhada dos dados digitais fornecidos pelo relé mostra que apesar de a corrente e a tensão serem conforme esperadas para a partida do motor, existe uma variação na tensão de sequência-positiva $V_1(\text{cyc})$ e corrente de sequência-positiva $I_1(\text{cyc})$. A Fig. 9 exibe um gráfico com o resultado da variação da resistência de partida durante os primeiros 8 ciclos da partida do motor.

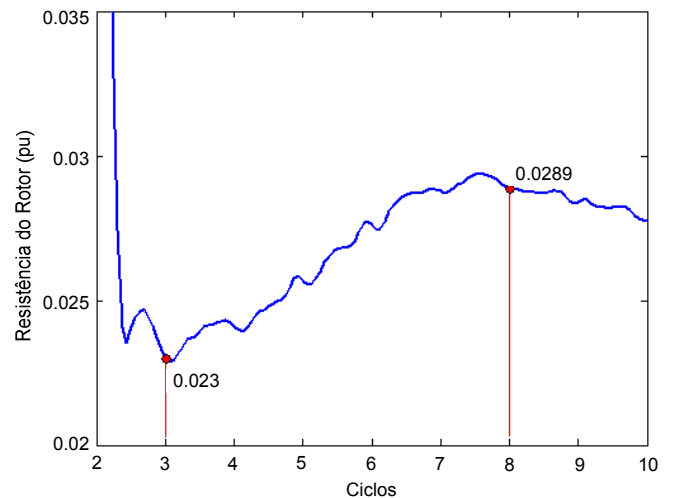


Fig. 9. Resistência de Partida Variando Durante a Partida 3

Durante os primeiros ciclos da partida, a resistência do rotor está no seu valor de R_M inicial e o escorregamento S é 1.0. Portanto, a resistência térmica do estator, R_S , pode ser determinada usando a resistência inicial medida, R_P , em (4). O ciclo inicial para o qual R_P é medida não é crítico se a resistência inicial permanecer constante após um tempo de estabelecimento de 1 ou 2 ciclos. Este não é o caso deste SBFP de 5,500 hp, conforme mostrado na Fig. 9. Para lidar com esta resistência de partida variando, o software do relé foi modificado para selecionar o valor mínimo de R_P durante os primeiros ciclos.

A Fig. 10 mostra um relatório de partida do motor deste SBFP de 5,500 hp sem novas mudanças de ajuste e software do relé que está selecionando o valor mínimo de R_p ao longo dos primeiros ciclos. As linhas mostram a corrente do motor, tensão nos terminais do relé, temperatura do rotor em p.u. do valor de trip ou capacidade térmica, e escorregamento. Este relatório de partida do motor mostra que quando o escorregamento diminui, a resistência calculada do rotor está diminuindo à medida que o motor acelera. Durante os 11 segundos da partida, a temperatura do rotor atinge 89.5% da máxima temperatura permitida, enquanto o motor leva 3 segundos completos a mais do que o tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade de 8 segundos para partir com sucesso.

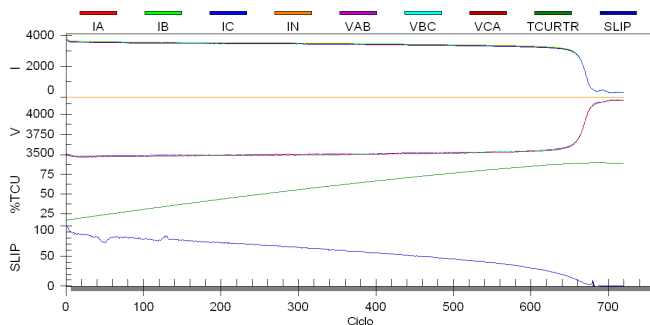


Fig. 10. Relatório de Partida do Motor SBFP, Agosto de 2009

B. Exemplo 2: Ventilador de Tiragem Forçada de 2,300 hp

Os dados seguintes estavam disponíveis para este motor de 4 kV, 2,300 hp:

- FLA = 295 A
- Corrente do rotor travado = $5.6 \cdot FLA$
- SF = 1.0
- RPM para carga nominal (velocidade nominal) = $nr = 1,190$ rpm
- LRQ = $0.80 \cdot$ torque nominal
- Tempo seguro do limite térmico do motor para perda de velocidade = 9.0 segundos
- Tensão = 4,000 V

Essas informações forneceram os dados necessários para calcular os ajustes do relé digital. FLA foi ajustada em 295 A. Após a análise dos dados digitais fornecidos pelo relé referentes a uma partida inicial do motor, o ajuste da corrente do rotor travado foi aumentado de $5.6 \cdot FLA$ para $6.8 \cdot FLA$. SF foi ajustado em 1.05 para fornecer uma pequena margem acima das condições nominais. Os ajustes de SF afetam o modelo da sobrecarga do estator, mas não afetam o modelo do rotor. FLS foi calculado como: $(FLS = 1 - nr/ns)$ ($FLS = 1 - 1190/1200 = 0.0083$). O tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade foi apenas ligeiramente aumentado para 9.5 segundos.

Os ajustes seguintes foram aplicados ao relé:

```

RID      := UNIT 3 FD FAN 2
TID      := 3-532-CB-B10
CTR1     := 450   FLA1    := 295.0   E2SPEED := N     CTRN    := 100
PTR      := 35.00  VNOM   := 4160   DELTA_Y := WYE   SINGLEV := N
E4MOTOR  := Y     FLS    := 0.0083  LRQ     := 0.80  49RSTP  := 90
SF       := 1.05  LRA1   := 6.8     LRTHOT1 := 9.5   RTC1    := AUTO
TCAPU    := OFF   TCSTART := 90     TCLRNEN := N     COOLTIME:= 124
  
```

A Fig. 11 exibe um relatório de partida do motor para este “FD fan” de 2,300 hp. As linhas mostram a corrente do motor, tensão medida no relé, capacidade térmica calculada e escorregamento. O tempo real de aceleração do motor está mostrado como sendo em torno de 750 ciclos, ou 12.5 segundos. A capacidade térmica usada está atingindo 82.8%. Este tempo de partida de 12.5 segundos é 3 segundos maior do que o tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade. Este relatório de partida do motor mostra que quando o escorregamento diminui, a resistência calculada do rotor está diminuindo à medida que o motor acelera. A temperatura do rotor não é uma relação linear, e este “FD fan” com um tempo seguro do limite térmico do motor por perda de velocidade de 9.5 segundos pode levar 12.5 segundos ou mais para partir sem trips prematuros do motor.

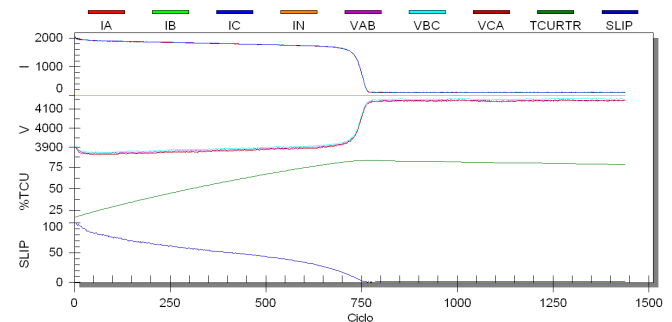


Fig. 11. Relatório de Partida do Motor da Unidade 3 do “FD Fan” 2

O relé oferece supervisão para impedir a partida do motor até que a capacidade térmica do motor tenha capacidade suficiente disponível para partir. O ajuste do relé TCSTART = 90 consiste num nível de inibição da partida em que a capacidade térmica do rotor requerida para partir o motor é menor do que TCSTART.

Quando ocorre a parada do motor, não há mais qualquer corrente circulando. O tempo necessário para resfriar o motor até um limite térmico pré-ajustado depende da capacidade térmica no instante da parada do motor, do ajuste de reset da capacidade térmica, e da constante de tempo de resfriamento. A equação seguinte define o tempo de bloqueio onde COOLTIME é um ajuste do relé e %TCRESET é igual a 100 menos TCSTART.

$$\text{Tempo de Bloqueio } T_{\text{LOCKOUT}} = \frac{\text{COOLTIME}}{3} \cdot \ln\left(\frac{\%TC}{\%TC_{\text{RESET}}}\right) \quad (8)$$

O fabricante do motor pode fornecer os parâmetros de resfriamento para um motor parado na forma de uma constante de tempo de resfriamento ou um tempo de resfriamento. Se o fabricante fornecer o tempo real de resfriamento para o motor parado, este tempo pode ser usado diretamente para o tempo de resfriamento parado do relé. O tempo de resfriamento parado do relé (COOLTIME) é a constante de tempo de resfriamento multiplicada por 3.

Quando a constante de tempo de resfriamento não é fornecida pelo fabricante do motor, a equação seguinte pode ser usada para calcular o tempo de resfriamento.

Constante do Tempo de Resfriamento

$$RTC = \frac{(TD + 0.2) \cdot LRTHOT}{60 \cdot \ln \left(\frac{LRA^2 - (0.9 \cdot SF)^2}{LRA^2 - (SF)^2} \right)} \text{ minutos} \quad (9)$$

Usando os ajustes do relé para este “FD fan” de 2,300 hp, a constante do tempo de resfriamento pode ser calculada.

Constante do Tempo de Resfriamento

$$RTC = 41.03 = \frac{(1.0 + 0.2) \cdot 9.5}{60 \cdot \ln \left(\frac{6.8^2 - (0.9 \cdot 1.05)^2}{6.8^2 - (1.05)^2} \right)} \text{ minutos} \quad (10)$$

Os dados fornecidos para este motor de 2,300 hp não incluíam a constante de tempo de resfriamento, logo um ajuste de $RTC \cdot 3 = 124$ foi aplicado ao relé.

Este relé de proteção de motores está em serviço há alguns meses; portanto, há relatórios adicionais disponíveis no relé. Um deles é o relatório de operação do motor mostrado na Fig. 12. Este relatório verifica a consistência dos dados de partida considerando múltiplas partidas. O relatório continua a acumular os dados mostrados até que sejam apagados manualmente.

A partir deste relatório, pode-se ver que o motor partiu 46 vezes desde 11 de abril de 2009, e que a capacidade térmica média usada (TCU) é de 82.5% com um pico de 100.4%. Nessas 46 partidas, o tempo de partida teve uma média de 12.8 segundos com um pico ou tempo máximo de partida de 14.1 segundos.

Este relatório de operação do motor também inclui dados de trip e alarme. O relatório mostra dois trips com rotor travado. Esses trips ocorreram após uma interrupção para manutenção. Durante o retorno para entrada em serviço, os fusíveis do secundário não foram substituídos, e consequentemente a tensão nos terminais do relé permaneceu em zero para duas tentativas de partida do motor. Após a restauração dos fusíveis, o motor partiu com sucesso. O fato de que os fusíveis do secundário não foram instalados durante uma tentativa de partida é confirmado pelo pico mínimo da tensão de partida (Min Start V) mostrado como 0.0 V.

UNIT 3 FD FAN 2 3-532-CB-B10		Date: 08/05/2009	Time: 13:49:57
		Time Source: Internal	
Operating History (elapsed time in ddd:hh:mm)			
Last Reset Date	04/11/2009		
Last Reset Time	04:50:45		
Running Time	30:02:04		
Stopped Time	> 84:20:17		
Time Running (%)	26.2		
Total MWhr (MWhr)	197.9		
Number of Starts	46		
Emergency Starts	0		
Avg/Peak Data			
	AVERAGE	PEAK	
Start Time (s)	12.8	14.1	
Max Start I (A)	1977.7	2041.0	
Min Start V (V)	3696.2	0.0	
Start %TCU	82.5	100.4	
Running %TCU	10.1	20.7	
Running Cur (A)	104.1	631.6	
Running kw	274.7	2084.4	
Running kVARin	694.5	2281.6	
Running kVARout	0.0	151.3	
Running kVA	747.8	3090.4	
Trip/Alarm Data			
	ALARMS	TRIPS	
Overload	0	0	
Locked Rotor	0	2	
Undercurrent	0	0	
Jam	0	0	
Current Imbal	0	0	
Overcurrent	0	0	
Ground Fault	0	0	
Speed Switch	0	0	
Undervoltage	0	0	
Overvoltage	0	0	
Underpower	0	0	
Power Factor	0	0	
Reactive Power	0	0	
Phase Reversal	0	0	
Underfrequency	0	0	
Overfrequency	0	0	
Start Timer	0	0	
Remote Trip	0	0	
Other Trips	0	0	
Total	0	2	

Fig. 12. Relatório de Operação do Motor da Unidade 3 do “FD Fan” 2

Um relatório adicional foi coletado mostrando dados de partida refinados em intervalos de um mês. O relatório das tendências de partida do motor coleta até dezoito médias de 30 dias das informações das partidas do motor. Este relatório das tendências de partida do motor da Fig. 13 mostra 42 partidas ao longo de um período de 106 dias. O relatório das partidas do motor foi apagado em 21/04/2009, enquanto o relatório de operação do motor foi resetado em 11/04/2009. Houve quatro partidas do motor entre essas duas datas.

O relé de proteção do motor da Unidade 3 do “FD Fan” 2 está em serviço há mais de quatro meses. Este relatório das tendências de partida do motor mostra dados consistentes em termos do tempo médio de partida e capacidade térmica usada para o motor. As condições de partida são claramente bem consistentes para esta Unidade 3 do “FD Fan” 2; de outra forma, haveria uma maior variação da capacidade térmica porcentual. Um aumento da capacidade térmica porcentual ao longo do tempo poderia indicar um aumento gradual do torque de carga.

UNIT 3 FD FAN 2 3-532-CB-B10		Date: 08/05/2009	Time: 13:50:08			
		Time Source: Internal				
Record Number	Began on Date	Number of Starts	Start Time (s)	Start %TCU	Max Start I (A)	Min Start V (V)
1	07/20/2009	0	---	---	---	---
2	06/20/2009	2	12.8	81	1980	3884
3	05/21/2009	21	12.7	81	1975	3861
4	04/21/2009	20	13.0	82	1980	3864
5	---	---	---	---	---	---
6	---	---	---	---	---	---
7	---	---	---	---	---	---
8	---	---	---	---	---	---
9	---	---	---	---	---	---
10	---	---	---	---	---	---
11	---	---	---	---	---	---
12	---	---	---	---	---	---
13	---	---	---	---	---	---
14	---	---	---	---	---	---
15	---	---	---	---	---	---
16	---	---	---	---	---	---
17	---	---	---	---	---	---
18	---	---	---	---	---	---

Fig. 13. Relatório das Tendências de Partida do Motor da Unidade 3 do “FD Fan” 2

V. CONCLUSÕES

A proteção dos motores desta usina foi aperfeiçoada com o uso de relés digitais. O modelo térmico dependente do escorregamento protege os motores ao mesmo tempo em que permite tempos longos de aceleração. O relé digital fornece supervisão para evitar a partida do motor até que a capacidade térmica do motor tenha capacidade de partida disponível suficiente e para evitar danos aos motores causados pelas partidas múltiplas e frequentes do motor. Os relatórios das partidas do motor e os dados de tendências mensais fornecidos pelos relés podem ser usados para monitorar as condições variáveis da partida. Os relatórios de evento e relatórios das partidas do motor fornecem dados que podem ser usados para aperfeiçoar os ajustes e melhorar a proteção do motor, bem como confirmar uma operação válida da proteção sem necessidade de efetuar uma reavaliação completa da proteção.

A substituição dos relés de proteção de motores de 4 kV e das caixas dos relés auxiliares existentes por novos relés digitais fornece os seguintes benefícios:

- Garante uma proteção confiável para os motores.
- Elimina o risco à segurança associado a uma falha catastrófica de uma peça grande dos equipamentos de rotação.
- Reduz o risco associado à falha de equipamentos e trips induzidos pela migração da prata (“silver migration”).
- Elimina o tempo de manutenção gasto para calibração de cada relé.
- Elimina a necessidade de substituição das caixas dos relés auxiliares.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] S. E. Zocholl, “Tutorial: From the Steinmetz Model to the Protection of High Inertia Drives,” proceedings of the 33rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2006.
- [3] S. E. Zocholl, AC Motor Protection, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2003.

VII. BIOGRAFIAS

Kyle Craig recebeu seu BEng em engenharia elétrica da Carleton University, Ottawa, Canadá, em 2004, e seu MEng engenharia de sistemas elétricos de potência da University of Waterloo, Waterloo, Canadá, em 2009. Ele ingressou na Ontario Power Generation em 2004 como estagiário de engenharia na Lennox GS em Kingston, Ontario. Em 2005, passou a ser engenheiro de estações térmicas na Lennox GS com foco em gerenciamento de projetos e relés de proteção. É registrado como Engenheiro Profissional em Ontario desde 2009.

Amy Sinclair recebeu seu BSc em engenharia elétrica da Queen’s University, Kingston, em 1989. Ela ingressou na Ontario Hydro em 1989, trabalhando por dez anos como engenheira de proteção e controle nas áreas de desenvolvimento, operações e gerenciamento de projetos. Em 2000, ingressou na ELECSAR Engineering como gerente de projetos com foco em projeto de subestações e relés de proteção. Desde dezembro de 2006, ela trabalha na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheira de aplicação de campo em Chatham, Ontario. É registrada como Engenheira Profissional em Ontario desde 2001.