

Monitoramento de Motores Assíncronos Através de Relés de Proteção Avançados

Renan Bernardes e Geraldo Rocha, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Resumo—O artigo apresenta aspectos fundamentais relativos ao monitoramento online e offline de máquinas elétricas rotativas, através da aplicação de relés digitais de proteção baseados em microprocessadores. Estes IEDs (Intelligent Electronic Devices), além de possuírem funções para proteção dos equipamentos, também oferecem recursos para monitoramento e controle, sem a necessidade de investimentos em novos sistemas de automação, transformadores de instrumentos e medidores setoriais. As informações dos relés podem ser disponibilizadas em uma rede de comunicação de alta velocidade, contribuindo para o melhor rendimento e utilização das máquinas elétricas.

Palavras-chaves—indústrias, motor, monitoramento, qualidade de energia, relés de proteção.

I. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas são utilizadas em diversos segmentos industriais, principalmente os motores assíncronos, também conhecidos como motores de indução trifásicos.

Por possuírem custos financeiros significativos e por serem responsáveis pelo acionamento de cargas importantes, os motores assíncronos necessitam maior atenção e preocupação dos operadores e técnicos de manutenção, pois a perda temporária de um motor pode significar a parada de todo o processo de produção e conseqüentemente um prejuízo a empresa.

Devido às suas múltiplas vantagens (versatilidade, excelente rendimento, alto desempenho, etc.), verifica-se o crescimento e generalização dos automatismos, do uso de controladores de velocidade na indústria, dos sistemas de informática, das lâmpadas fluorescentes compactas, tanto na indústria como no uso doméstico. Tais equipamentos apresentam um comportamento não linear no sistema, cujas correntes drenadas não apresentam comportamento senoidal, alterando em níveis consideráveis a qualidade da energia e aumentando a sensibilidade dos processos produtivos e das cargas industriais.

Os problemas e distúrbios referentes à qualidade da energia elétrica (QEE) estão diretamente relacionados ao desempenho, desgaste e redução da vida útil dos equipamentos. Estes fenômenos passam muitas vezes despercebidos pelos operadores e pelos atuais sistemas de supervisão e controle, porém aos motores assíncronos podem causar grandes danos.

Assim, torna-se necessário ferramentas que permitam primeiramente identificar problemas, para posterior análise de causas e busca por ações que visam a mitigação dos mesmos, tais como aplicação de filtros ou o remanejamento de cargas.

Muitas das informações necessárias para esta análise estão disponíveis em relés digitais de proteção avançados, como monitoramento de temperaturas, monitoramento de correntes e tensões, distorção harmônica total (DHT) e níveis de

harmônicos e o que se constata é a subutilização desses recursos.

Além disso, informações providas dos relés de proteção podem ser disponibilizadas em uma rede de comunicação para sistemas digitais de supervisão e controle permitindo a não só o monitoramento online do equipamento como também offline, através da criação de bancos de dados históricos, com o armazenamento das grandezas medidas, dos relatórios de eventos e partidas e de oscilografias, principalmente nas indústrias onde são aplicados comumente diversos tipos de motores e acionamentos.

O objetivo principal deste artigo é chamar a atenção para esta subutilização e apresentar as ferramentas de monitoramento fornecidas pelos relés digitais de proteção para análise e diagnóstico preditivos, para busca de ações visando a otimização da operação e ampliação da vida útil de motores de indução, sem a necessidade de investimentos em sistemas de monitoramento paralelos.

II. IMPACTOS DA QEE SOBRE MÁQUINAS

Para melhor esclarecimento e compreensão dos prejuízos e danos que determinados fenômenos de qualidade de energia podem ocasionar às máquinas elétricas, será abordada uma breve introdução teórica sobre o comportamento dos motores operando em sistemas elétricos com indicadores de QEE não adequados.

O artigo abordará os motores assíncronos, também conhecidos como motores de indução trifásicos (MITs), mas pode-se estender muitos dos efeitos também aos motores síncronos e de corrente contínua.

Fenômenos e distúrbios como variações de tensão de curta duração, transitórios eletromagnéticos e flutuação de tensão, podem causar danos e falhas de funcionamento em motores, principalmente ao afetarem os equipamentos de controle e acionamento dos mesmos. Afundamentos de tensão, por exemplo, podem causar a parada de motores devido ao mau funcionamento dos acionamentos de velocidade variável, que são muito sensíveis a este fenômeno.

Contudo, serão abordados a seguir, os principais distúrbios e a maneira com que afetam diretamente os motores, sendo eles: elevados níveis de distorção harmônica, desequilíbrio (ou desbalanço) de tensão e sobrecarga térmica. Também será dada ênfase às situações críticas para os motores, como partida e travamento de rotor por exemplo.

A. Distorção Harmônica

Com o crescente uso de cargas não lineares, os níveis de distorção harmônica estão atingindo altos valores e afetando cada vez mais as cargas nos sistemas elétricos industriais.

Alguns exemplos típicos de cargas não lineares são largamente utilizados, como microcomputadores, retificadores, lâmpadas de descarga, acionamento de velocidade variável, etc e os motores conectados a barramento com distorção harmônica de tensão podem ter o seu desempenho muito afetado.

As distorções harmônicas são geralmente medidas comparando-se a contribuição total das harmônicas em relação à componente fundamental do sinal.

Em um motor de indução trifásico (MIT), tensões de alimentação distorcidas podem produzir sobreaquecimento, perda de eficiência, queda do fator de potência verdadeiro e vibrações mecânicas na máquina.

As perdas por efeito Joule no rotor sofrem uma variação maior que as perdas no estator, portanto o sobreaquecimento do rotor é o principal problema associado às distorções de tensão nos terminais do motor de indução. A Fig. 1 abaixo ilustra as perdas elétricas em motores de indução trifásicos:

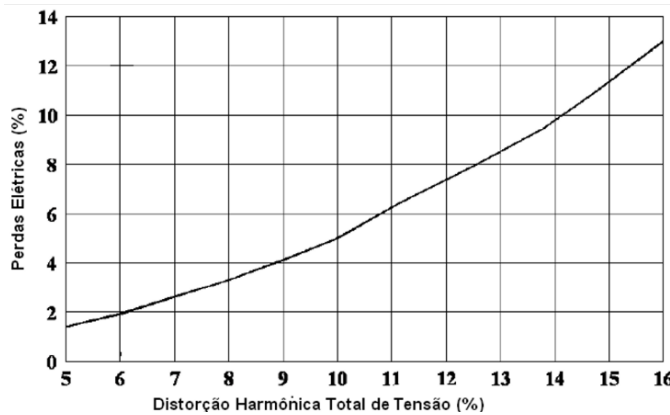


Fig. 1. Relação entre a distorção harmônica de tensão e as perdas elétricas nos motores de indução trifásicos.

Componentes harmônicas presentes na tensão de alimentação de um motor de indução geram oscilações em seu torque eletromagnético. A oscilação mecânica ocorre devido à interação entre as correntes harmônicas induzidas no rotor e o campo magnético no entreferro na frequência fundamental. Embora o valor médio das oscilações do torque eletromagnético seja praticamente zero para quaisquer taxas de distorção de harmônicas aplicadas ao MIT, as oscilações resultantes são suficientes para aumentar as vibrações no rotor, elevando as perdas por fricção nos mancais de rolamento, reduzindo a vida útil e aumentando a probabilidade de uma falha mecânica da máquina.

Harmônicas conhecidas como de sequência negativa (como 2ª e 5ª ordem por exemplo) tendem a gerar um torque contrário ao produzido na frequência fundamental, produzindo então uma pequena variação negativa na velocidade da máquina, aumentando o escorregamento, a corrente circulante e o aquecimento no rotor.

No que se refere à harmônicas, é importante avaliar as correntes e tensão de alimentação, o rendimento, fator de

potência, velocidade, e, logicamente, a temperatura do motor de indução.

B. Desequilíbrio de Tensão e Corrente

Os desequilíbrios ou desbalanços de tensão pode ser definido como o desvio máximo da média das tensões trifásicas, dividido pela média das tensões trifásicas, expressado em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária.

Estes desequilíbrios de tensão podem causar problemas indesejáveis na operação de diversos equipamentos.

Para as análises dos efeitos de tensões desequilibradas aplicadas a um motor de indução, consideram-se somente os efeitos produzidos pelas tensões de sequência negativa, que resultam em um torque pulsante no eixo da máquina, causando assim sobreaquecimento. Como consequência direta desta elevação de temperatura tem-se a redução da expectativa de vida útil dos motores, visto que o material isolante sofre uma deterioração mais acentuada na presença de elevadas temperaturas nos enrolamentos.

A Fig. 2 abaixo ilustra a estimativa de perda da vida útil em relação ao desequilíbrio de tensão no sistema de alimentação da máquina elétrica.

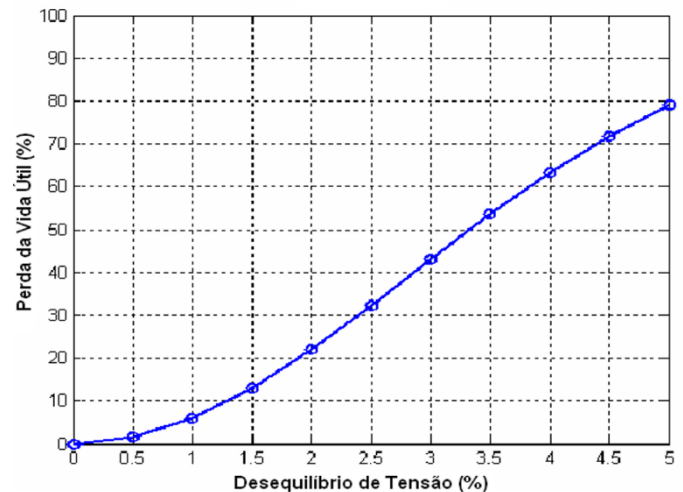


Fig. 2. Relação entre o desequilíbrio de tensão e a perda da vida útil dos motores de indução trifásicos.

O desequilíbrio (ou desbalanço) de corrente também afeta os motores diretamente. O impacto deste desequilíbrio é muito parecido com o efeito das harmônicas de 2ª, 5ª e 11ª ordem, pois a componente de sequência negativa, tende a provocar um torque contrário em relação à componente de sequência positiva.

Desequilíbrios de corrente também podem ocasionar desequilíbrios de tensão no barramento, afetando outros motores e cargas instaladas.

C. Sobrecargas Térmicas

As sobrecargas podem ser subdivididas em dois tipos, sobrecarga no estator e sobrecarga no rotor.

1) Sobrecarga No Estator

A temperatura no estator está relacionada principalmente com a corrente circulante no enrolamento e pelas tensões de alimentação. Cargas maiores que o fator de serviço do motor causam aquecimento (RI2) excessivo nos enrolamentos do estator. A sobrecarga térmica ainda está relacionada com o aquecimento causado pelas correntes e tensões de sequência negativa (citadas anteriormente), em conjunto com as componentes de sequência positiva.

2) Sobrecarga No Rotor

A temperatura no rotor está associada ao valor de sua resistência, que varia com o escorregamento da máquina; quanto maior for o escorregamento, menor é a resistência rotórica. Durante a partida, a resistência rotórica atinge baixo valor enquanto o escorregamento e a corrente circulante são elevados. Isto gera calor e a máxima capacidade térmica do rotor pode ser atingida.

A Fig. 3 abaixo ilustra o comportamento térmico do estator e do rotor, durante o período de partida e de operação normal. É possível notar que durante a partida a temperatura do rotor atinge altos níveis e, que ao longo da operação (em condições normais), a capacidade térmica do estator vai se aproximando do limite.

Em relação à sobrecarga térmica, é importante realizar a modelagem precisa, para verificar de maneira confiável a temperatura e desgaste e os esforços térmicos reais enfrentados pelo equipamento, seja em condições normais de operações ou em situações críticas como partidas, travamento do rotor e cargas emperradas.

Em resumo, todos os eventos e fenômenos citados, causam de alguma forma a elevação da temperatura no motor que contribui para o desgaste dos materiais isolantes na máquina. Este desgaste, conforme mencionado, ocasionam diversos problemas para o funcionamento e operação dos motores de maneira geral.

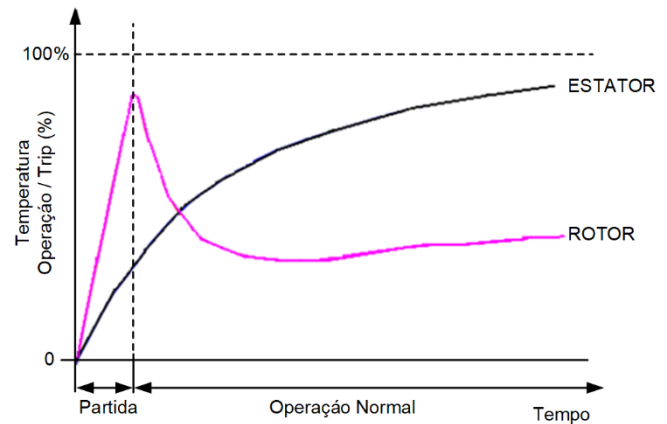


Fig. 3. Comportamento térmico dos enrolamentos dos motores.

III. RELÉS DE PROTEÇÃO AVANÇADOS

Com o desenvolvimento tecnológico e a expansão da utilização de equipamentos digitais microprocessados nos sistemas elétricos, os relés de proteção adquiriram diversas funcionalidades e recursos. Desde então, os relés não podem ser vistos apenas como mecanismo para proteção dos sistemas e equipamentos, e devem também ser considerados como IEDs (Intelligent Electronic Devices) para monitoramento e medição avançada de grandezas, funções de controle e automação, além da possibilidade de comunicação dos dados para centros de controle e operação remotos.

A Fig. 4 abaixo ilustra um resumo com as principais funcionalidades dos relés de proteção.

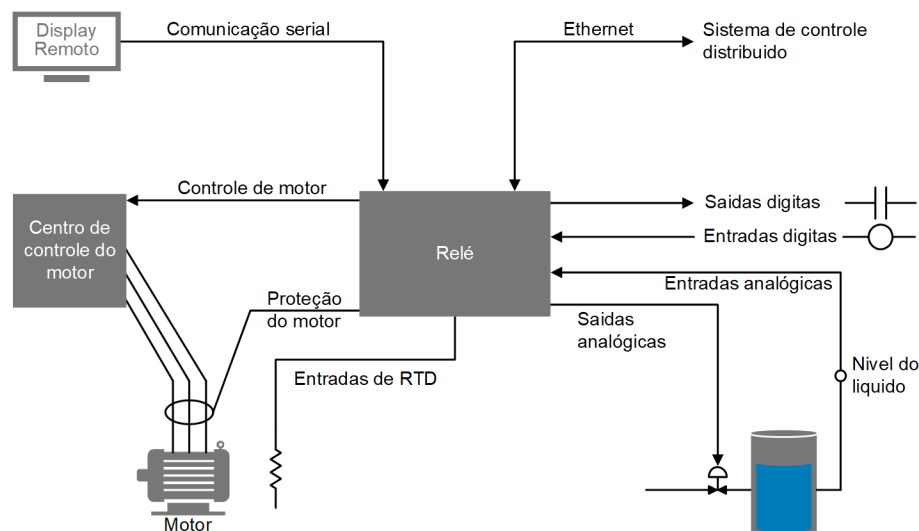


Fig. 4. Principais funcionalidades do relé de proteção de motores.

A. Medição e Monitoramento Avançados

As funções de medição e monitoramento presentes no relé são ferramentas importantes para gerenciamento de energia, produção industrial e programa de manutenção preditiva.

Também fornecem informações importantes para o modelamento e validação de modelos de sistemas industriais em programas para análise em sistemas elétricos de potência.

As principais grandezas a serem medidas e calculadas pelo relé estão abaixo:

- Grandezas Operacionais – tensão, corrente, potência e energia.
- Desequilíbrio de Tensão (%).
- Distorção Harmônica Total (%).
- Capacidade térmica no estator e no rotor (%), através de modelagem térmica precisa.
- Escorregamento (slip).
- Resistência Rotórica.
- Temperatura do estator e do mancal, através de módulos de RTD's (Resistive Temperature Device).

Com estas informações, é possível associar um sobreaquecimento no motor com a ocorrência de desequilíbrio de tensão ou elevados níveis de distorção harmônica, se estes indicadores estiverem acima de limites predeterminados e predefinidos.

Situações como rotor travado, sobre ou subvelocidade e desbalanços, são facilmente identificadas, orientando as atividades das equipes de manutenção para melhor utilização e eficiência das máquinas elétricas.

Para melhor análise e visualização, é importante que o relé também forneça recursos de oscilografia, gráficos e relatórios de estatísticas de operação e partida do motor. As principais funções de monitoramento seriam:

- Oscilografia baseadas em eventos “trigger”.
- Estatísticas de operação do motor.
- Relatório de tendências (tempo de aceleração, corrente de partida, tensão média, capacidade térmica, número de partidas).
- Relatórios de partida, com valores de corrente, tensão, escorregamento calculado (%) e capacidade térmica, e alta taxa de amostragem.

A Fig. 5 ilustra um exemplo do gráfico do relatório de partida, gerado durante a partida de um motor de indução trifásico.

Neste gráfico são mostradas as correntes e tensões nas 3 fases, além de ilustrar a capacidade térmica do rotor e o escorregamento. Este gráfico permite fácil identificação que possa ocorrer durante a partida, como por exemplo um afundamento momentâneo de tensão no barramento, devido a alta corrente circulante e a consequente queda de tensão no barramento além de fornecer importantes informação à equipe de manutenção para revisão de ordens de ajustes, otimizando a operação do equipamento.

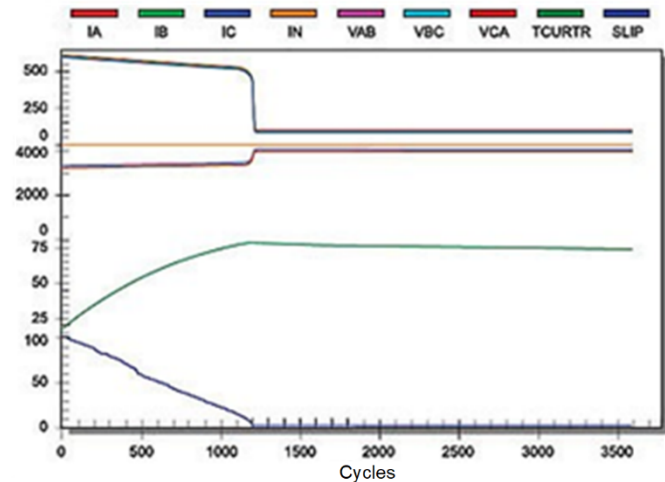


Fig. 5. Gráfico com relatório de partida de um motor de indução trifásico, sendo qualquer problema ou anomalia facilmente identificada.

Conforme citado anteriormente, é extremamente importante que o relé realize o cálculo dinâmico da resistência rotórica, de acordo com o escorregamento momentâneo. Este cálculo permite partidas mais confiáveis e prolongadas (para cargas de alta inércia), sem a possibilidade de falhas ou desligamentos indevidos do motor, pois a temperatura e a capacidade térmica do enrolamento estão sendo monitoradas com alta precisão. Relés convencionais baseados somente no modelo I2t para a modelagem térmica podem atuar incorretamente, desligando motores que acionam cargas com alta inércia e que possuem tempo de partida maior que o tempo limite de rotor travado do motor.

B. Funções de Controle

Os relés digitais de proteção possuem equações lógicas que permitem ao usuário criar seus próprios controles e automatismos através do uso de entradas e saídas digitais e analógicas.

Desta forma, o usuário facilmente implementa comandos automático de desligamento e partida dos motores, baseados em informações das grandezas medidas, diversos sensores existentes e nas lógicas definidas. Além disso, também podem ser feitos comandos locais, por botões configuráveis no painel frontal ou comandos remotos a partir de um sistema digital de supervisão e controle.

Outros processos associados podem ser controlados, como níveis de reservatórios, controle do fator de potência e de reativos, por exemplo.

C. Comunicação e Acesso Remoto aos Dados

Os relés de proteção também oferecem recursos avançados de comunicação com redes de Supervisão e Controle, permitindo a visualização de informações online das grandezas elétricas e térmicas dos motores, assim com funções de alarme e trip de outra função de proteção relacionada ao relé.

Com o uso de interfaces ethernet é possível realizar comunicações simultâneas com sistemas supervisórios e ainda enviar mensagens de alta velocidade de trip ou alarme para os demais equipamentos da rede ethernet, permitindo a implementação de seletividade lógica, sem a necessidade de lançamento de cabos metálicos.

Permitem também o acesso local e remoto de engenharia para coleta de eventos, data logs e alteração ou modificação de ajustes e parâmetros que podem ser feitos através de software amigável instalado em qualquer computador que tenha acesso a rede de comunicação associada ao relé, ou ligados diretamente a ele.

A utilização de concentradores de dados permite que dados e informações provenientes de vários relés e até mesmo outros IED's sejam enviadas para um centro de supervisão e controle através de um só link de comunicação. Assim, sendo o operador pode ter acesso a toda informação relevante da planta industrial, com alarmes e histórico detalhado de eventos para análise e busca de soluções. A Tabela I abaixo mostra um resumo contendo as principais vantagens e benefícios das ferramentas e recursos dos relés de proteção microprocessados avançados. São mostradas vantagens para a equipe de manutenção, através de análises e tomada de ações corretivas e preventivas, assim como para o processo produtivo de maneira geral, uma vez que o número de paradas e desligamentos pode diminuir consideravelmente com o aproveitamento destes recursos.

TABELA I
RECURSOS E RESPECTIVAS VANTAGENS PARA
EQUIPE DE MANUTENÇÃO E PROCESSO PRODUTIVO

Ferramentas e Recursos	Equipes de Manutenção	Processo Produtivo
Modelagem Térmica Precisa	Estimativa correta da sobrecarga térmica do estator e do rotor	Não há desligamento indevido para cargas com alta inércia e cargas cíclicas
Registro de Oscilografia	Permite análise de falhas no sistema e identificação de causas	Redução no número de paradas futuras e rápido restabelecimento
Sequencial de Eventos	Identificação do exato instante dos últimos eventos	Redução no número de paradas futuras
Relatórios e Gráfico de Partida	Análise prática de qualquer anomalia que possa ocorrer durante a partida	Partidas futuras mais seguras e possibilidade de redução do tempo entre partidas
Relatório e Estatísticas de Operação	Visualização prática de dados, falhas e alarmes em determinado período, para ações preventivas	Redução do número de paradas e melhoria da eficiência do processo
Relatório de Tendências	Resumo com as informações relevantes das últimas partidas	Este acompanhamento permite identificar problemas internos e externos na partida
Integração em Rede	Acesso remoto a todas informações de todos IEDs da instalação	Telecomandos permitem maior rapidez para restabelecimento

IV. EXEMPLOS PRÁTICOS

Alguns exemplos práticos de identificação de problemas em motores e ações que trouxeram soluções e melhorias na utilização dos equipamentos e benefícios para a equipe de manutenção são citadas abaixo:

- Sobreaquecimento de Motor Síncrono devido a alimentação de tensão desequilibrada onde o relé de proteção forneceu esta informação e a indústria realizou o remanejamento de cargas monofásicas ligadas à mesma Subestação.
- Sobrecarga em um motor associado a britadeira, identificada devido à capacidade térmica do motor ser excedida, indicada pelo relé de proteção.
- Detecção de perda da eficiência do resfriamento pelo aumento da temperatura do RTD instalado no mancal do motor. O relé indicou alarme para esta situação e o sistema de ventilação foi substituído.
- Elevação da temperatura do rotor devido ao aumento de componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordem causadas pelo retificador de 6 pulsos. O cálculo do THD feito pelo relé indicou limites ultrapassados e a indústria realizou estudo para aplicação de filtros de harmônicos.
- Gerenciamento e fácil monitoramento do comportamento dos motores a partir do relatório estatístico de operação fornecido. A Fig. 6 abaixo ilustra um exemplo para este relatório, onde foram constatados 2 alarmes para situação de rotor travado no período em análise, sendo que uma delas implicou no desligamento (sinal de trip) da máquina.

XXX-XXX	Date: 04/25/2006	Time: 08:43:08
MOTOR RELAY	Time Source: Internal	
Operating History (elapsed time in ddd:hh:mm)		
Last Reset Date	04/25/2006	
Last Reset Time	08:09:22	
Running Time	> 0:00:26	
Stopped Time	0:00:06	
Time Running (%)	79.9	
Total MWhr (MWhr)	0.9	
Number of Starts	6	
Emergency Starts	0	
Avg/Peak Data		Trip/Alarm Data
	AVERAGE	PEAK
Start Time (s)	5.0	5.3
Max Start I (A)	1503.2	1504.0
Min Start V (V)	4016.5	4013.0
Start %TCU	63.6	71.0
Running %TCU	63.9	100.7
RTD %TCU	0.0	0.0
Running Cur (A)	252.1	253.0
Running kW	1760.0	1766.5
Running kVARin	63.6	70.5
Running kVARout	0.0	0.0
Running kVA	1761.2	1767.6
Max WDG RTD (C)	Fail	Fail
Max BRG RTD (C)	NA	NA
Ambient RTD (C)	Fail	Fail
Max OTH RTD (C)	NA	NA
Learn Parameters		
CoolTime (s)	Insufficient Data	
Start TC (%)	47	
	ALARMS	TRIPS
	Overload	0 0
	Locked Rotor	2 1
	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
	RTD	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	2 1

Fig. 6. Relatório estatístico de operação do motor para um determinado período.

A falta de monitoramento e acompanhamento térmico preciso pode acarretar em problemas mais graves, como queima de equipamentos e redução drástica da vida útil dos motores e máquinas elétricas, como mostrado.

IV. CONCLUSÕES

Tendo em vista todos os prejuízos e danos a que são submetidas as máquinas elétricas, é fundamental que se realize o monitoramento contínuo destes equipamentos. Os relés de proteção fornecem muitas das ferramentas necessárias para o acompanhamento detalhado do comportamento dos motores, facilitando a manutenção e melhor utilização dos motores, sem a necessidade de investimento em sistemas dedicados para controle, medição setorial e tão pouco transformadores de instrumentos adicionais. São constatados casos de investimentos em sistemas deste tipo devido à falta de conhecimentos dos recursos destes IEDs.

A utilização de rede de comunicação permite capturar e analisar as informações dos relés de maneira prática e fácil, em qualquer computador convencional ligados em rede com os relés de proteção, permitindo também a criação de um banco de dados histórico do motor, que contribuirá para a manutenção preditiva deste equipamento. A integração destes IEDs é bastante simples e flexível, podendo estar associados a outros tipos de equipamentos e diversos fabricantes.

Sendo assim, o bom aproveitamento dos recursos dos relés de proteção digitais microprocessados permite melhoria da eficiência do processo, redução de custos com manutenção e substituição de motores, e até mesmo o gerenciamento da energia elétrica consumida pelas máquinas.

V. REFERÊNCIAS

- [1] P. Whatley, M. Lanier, L. Underwood e S. Zocholl, “Proteção Avançada de Motores com o Modelo Térmico Dependente do Escorregamento: Um Estudo de Caso”, Sep. 2007
- [2] C. M. C. Brito e R. P. S. Leão, “Desempenho de um Motor de Indução Trifásico Submetido a Distorções Harmônicas na Tensão de Alimentação” SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2006.
- [3] E. Zanirato, “Vantagens Adicionais para a Equipe de Manutenção com a Utilização de Relés Microprocessados,”II PCIC BR – Petroleum and Chemical Industry Conference Rio de Janeiro, Brasil, Sep. 2008.