

Desenvolvimento de um Sistema de Detecção de Defeitos Precoces em Motores de Indução

Luiz Eduardo Borges da Silva, Demóstenes do E. Santos Jr., Germano Lambert-Torres, Erik Leandro Bonaldi e Levy Ely de Lacerda de Oliveira, Ronan Nogueira Dias, Wagner Rodrigues de Lima, Juliana Diniz Bezerra Cavalcanti Dias, Paulo Henrique R. P. Gama, Fabíola R. da Silva

Resumo — Este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo e de um sistema de diagnóstico das condições operacionais dos motores de indução da TermoPE. O crescente interesse na utilização da técnica de MCSA (análise da assinatura da corrente do motor) na manutenção preditiva de motores de indução trifásicos imputa a essa técnica uma responsabilidade enorme, pois, esta sempre será comparada à análise de vibrações. As vantagens de MCSA são bem claras e contundentes como a monitoração de máquinas de difícil acesso e segurança do funcionário coletor que não precisa mais ficar próximo de partes rotativas. Contudo para que um sistema baseado em MCSA se torne viável, ele deve diagnosticar o maior número possível de falhas, englobando problema na carga acoplada e no sistema de transmissão.

Palavras-Chave— Manutenção preditiva, Análise de sinais, Processamento digital de sinais, MSCA, Sistemas de apoio à tomada de decisão.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, a manutenção preditiva é uma das principais ferramentas utilizadas no ambiente industrial para se manter máquinas e equipamentos críticos disponíveis o maior tempo possível. Uma vez que uma parada não programada de uma máquina devido a falhas, pode implicar perda de produção e prejuízos muito maiores que o valor do próprio equipamento.

A monitoração remota tem um papel ainda maior em plantas com equipamentos críticos que necessitem de um monitoramento constante e intensivo. Neste tipo de monitoramento, evita-se a utilização de recursos humanos para a coleta de sinais, evitando-se a exposição de pessoal a áreas de risco desnecessariamente. Como exemplos de plantas com esse tipo de necessidade, podem-se citar as usinas nucleares, plantas petrolíferas, siderúrgicas e mineradoras.

Não existe no mercado um sistema de manutenção preditiva baseado na monitoração de motores através de assinatura elétrica com todas as características propostas. Os

sistemas mais completos disponíveis no mercado estão voltados para análise de vibração e não são específicos para coleta remota e análise automática dos dados, com a flexibilidade proposta.

O monitoramento remoto através da análise da assinatura elétrica vem se tornando uma crescente demanda das grandes empresas, uma vez que o monitoramento pela análise de vibração já está implantado e não cobre todo o universo de falhas possíveis. Vale ressaltar que apesar da técnica da análise da vibração também ser uma técnica não invasiva, quando o motor é inacessível ou está em ambientes muito agressivos a técnica é inviável, ao contrário das técnicas baseadas em assinatura elétrica, que não necessitam do acesso direto ao motor e sim à sua alimentação.

Assim, fica clara a aplicação do projeto em plantas térmicas devido a sua necessidade de alta confiabilidade e elevado número de áreas de risco com difícil acesso.

Muitas são as vantagens de um sistema de manutenção preditiva. Dentre elas se destacam: a análise de falhas através de técnicas não invasivas, o aumento da vida útil da máquina, a redução de manutenção corretiva, a redução de paradas não-programadas de produção de energia, o aumento de disponibilidade de máquina e o conseqüente aumento da produtividade e a redução do consumo de energia. Contudo, algumas questões importantes ainda se encontravam pendentes. São elas: como se realizar a monitoração de máquinas de difícil acesso, a segurança do técnico coletor e o diagnóstico automático de falhas.

II. A TÉCNICA DE ANÁLISE DA ASSINATURA DA CORRENTE DO MOTOR

Os motores são o centro da maioria dos processos de produção. Por isso essas máquinas merecem preocupações adicionais para se aumentar a confiabilidade do processo produtivo. Assim, muitas técnicas têm sido desenvolvidas com o propósito de se monitorar o comportamento e o desempenho do motor.

Entende-se por monitoração da condição de máquinas elétricas o processo contínuo de avaliação da saúde do equipamento durante toda sua vida útil. A principal função de um sistema de monitoração preditivo é reconhecer o desenvolvimento de falhas ainda em um estado inicial. Quanto mais prematura for a detecção da falha, mais fácil para o departamento de manutenção agendar uma parada programada para a correção do problema.

O processo de monitoração contínua da condição de máquinas elétricas vitais para o processo de produção traz

Luiz Eduardo Borges da Silva, Germano Lambert-Torres, Erik Bonaldi e Levy Ely de Lacerda de Oliveira são afiliados à Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria (e-mail: fupai@fupai.com.br).

Demóstenes do E. Santos Jr. é um profissional ligado à TermoPE, na cidade do Recife, Brasil.

R. N. Dias e W. R. de Lima, J. D. B. C. Dias trabalham na Termopernambuco S.A. (e-mail: ronan.dias@termope.com.br, wlima@termope.com.br, jdias@termope.com.br). P. H. R. P. Gama é consultor em P&D pela B&G Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos Ltda. (e-mail: paulogama@bgpesquisa.com.br). F. R. da Silva trabalha na Start (fabiola.start@termope.com.br)

benefícios significantes para a empresa. Os principais benefícios são: maior eficiência do processo produtivo, redução das perdas por paradas não-programadas, aumento da vida útil do equipamento, e criação de um histórico de falhas.

Neste item faz-se primeiramente uma classificação das atividades de manutenção com o intuito de se situar a técnica dentro do contexto da manutenção preditiva. Num segundo momento são apresentadas as técnicas de predição de falhas com um detalhamento maior da técnica de análise de vibrações. A razão é óbvia. Esta técnica é mais bem descrita em função de suas similaridades com a análise espectral de corrente, visando assim a conseqüente comparação entre as técnicas. Finalmente, apresenta-se um histórico da evolução da técnica de MCSA, uma descrição formal do funcionamento da técnica e dos conceitos relacionados e os padrões de falhas estudados no trabalho em questão.

A. Classificação das Atividades de Manutenção

O termo manutenção entendido como a ação de reparar ou executar serviços em equipamentos e sistemas, pode ter suas atividades classificadas em quatro grupos principais:

a) Manutenção corretiva: é a forma mais primária de manutenção, pois só é realizada após a ocorrência do defeito, que de uma forma geral, torna o equipamento indisponível para uso. As desvantagens oriundas deste tipo de manutenção são evidentes. Como exemplos, pode-se citar a ocorrência sistemática de paradas não-programadas; menor tempo de vida útil para a máquina que apenas recebe este tipo de manutenção; maior consumo de energia, já que com a presença da falha o motor necessita de mais corrente para manter o torque constante; etc.

b) Manutenção preventiva: é o nome que se dá ao conjunto de ações desenvolvidas com o intuito de se evitar a ocorrência de condições insatisfatórias, e conseqüentemente, se reduzir o número de ações corretivas. Ao se elaborar um plano de manutenção preventiva deve-se criar um conjunto de medições tecnicamente adequadas e selecionadas visando a confiabilidade e o custo do programa. O programa de manutenção preventiva pode ainda optar por três tipos de atividades: monitoramento contínuo, medições periódicas e técnicas preditivas.

c) Manutenção preditiva: como deve ter sido observado, a manutenção preditiva pode ser vista como uma sub-área da manutenção preventiva. Contudo, a manutenção preditiva apresenta características próprias como:

- Apoio em técnicas não-invasivas, ou seja, não é necessário parar a operação da máquina para sua aplicação;
- Eliminação de manutenção corretiva;
- Não consideração de informações como a durabilidade de componentes;
- Pode ser efetuada através de técnicas on-line ou off-line.

d) Manutenção sistemática: caracterizada pela substituição de componentes dos equipamentos ou pela substituição do equipamento como um todo [1].

B. Técnicas de Análise Preditiva

A monitoração das condições de funcionamento de uma

máquina elétrica pode se basear em métodos químicos, vibracionais, térmicos e/ou elétricos. De todas as técnicas de análise preditiva a que mais se assemelha a análise da assinatura da corrente elétrica é a técnica de análise de vibração. Por esta razão, apresenta-se uma pequena descrição da técnica com o propósito de propiciar em seguida uma comparação entre as análises de vibração e corrente.

C. A Monitoração da Vibração

Vibração pode ser definida como a oscilação de um corpo em torno de uma posição de referência. Trata-se freqüentemente de um processo destrutivo, ocasionando falhas nos elementos das máquinas por fadiga. Além disso, a vibração é a resposta às forças dinâmicas que atuam na máquina, que por sua vez, vibra em várias freqüências que se propagam por toda a máquina. Estas freqüências podem ser identificadas e, na maioria das vezes, relacionadas a um tipo de falha.

A análise de sinais de vibração pode acusar eventuais problemas em uma máquina e orientar sobre a execução ou não de manutenção na mesma. Toda máquina apresenta ruído e vibração devido à própria operação e excitações externas. Contudo, uma parcela das vibrações se deve a pequenos defeitos que comprometem a performance do equipamento. O aumento do nível de vibração é reflexo do agravamento do defeito.

O que faz da análise de vibrações um processo eficiente é que cada elemento da máquina induz uma excitação própria, gerando formas específicas de vibração. É justamente por essa razão que os defeitos nesses elementos podem ser detectados.

Efetuar a medição de vibração é uma tarefa que requer uma série de cuidados, pois engloba um grande conjunto de conceitos e regras práticas, exigindo certa experiência do técnico encarregado pela medição. Sejam alguns desses conceitos:

1. Escolha do ponto de medida: primeiramente é necessário saber o que se deseja medir, ou seja, quais são os componentes internos mais problemáticos. Solucionado este problema, deve-se agora buscar um ponto externo acessível durante o funcionamento da máquina que seja portador das informações desejadas. Isto porque a trajetória de vibração da fonte ao ponto de medição deve ser a mais sólida e curta possível, garantindo a fidelidade da transmissão. Normalmente, pontos de medição são marcados nas máquinas para permitir comparação entre as sucessivas medições, pois pontos diferentes de medição podem ter vibrações com características diferentes.

2. Escolha dos parâmetros a medir: o movimento vibratório pode ser expresso na forma de deslocamento, velocidade ou aceleração. Evidentemente, cada um desses parâmetros tem sua utilidade dentro da análise vibracional. Por exemplo, na análise do espectro de vibração se utiliza o espectro de deslocamento quando o interesse é por falhas de componentes de freqüência mais baixas. Quando se deseja observar um espectro mais equilibrado, procurando medir eventuais problemas em qualquer freqüência, se utiliza o espectro de velocidade. Por fim, quando se deseja que as componentes de freqüências mais altas tenham um maior

destaque ou maior influência na análise global, utiliza-se o espectro de aceleração.

3. Instrumentação: são encontrados no mercado diversos tipos de instrumentos para a aquisição e análise do sinal de vibração. As opções vão de aparelhos extremamente simples a sistemas computadorizados com várias ferramentas de análise. A escolha da instrumentação a ser utilizada deve levar em consideração o ambiente (temperatura, contaminação, umidade, campo magnético, etc), o nível da equipe que executa o trabalho, e a importância da medida.

Várias são as formas de monitoração da condição de máquinas rotativas utilizando análise de vibração. Neste texto destacam-se: monitoração do nível global e monitoração do espectro de frequência.

Monitoração do nível global:

Esta é a forma mais simples de monitoração da condição de máquinas elétricas. A única medida a ser efetuada é o valor RMS do nível de vibração sobre uma faixa de frequência pré-selecionada. Normalmente, o parâmetro escolhido é a velocidade de vibração e as faixas de frequência mais comuns são de 10 Hz a 1 kHz ou de 10 Hz a 10 kHz.

Com o passar dos anos, uma base estatística respeitável foi desenvolvida, propiciando o aparecimento das cartas de severidade, ou seja, tabelas que estabelecem os níveis de alarme ou as condições da máquina em função do nível de vibração medido.

É importante ressaltar que esta técnica não dá um diagnóstico detalhado, informando em que elemento da máquina ocorreu a falha, mas sim uma indicação da saúde geral da máquina. Outro ponto importante é a utilização da monitoração do nível global como um primeiro diagnóstico e depois fazer a análise espectral para se saber onde provavelmente a falha está se desenvolvendo.

Como se pôde observar, a força desta técnica está na sua simplicidade. Ela requer uma instrumentação simples, contudo uma alta demanda de pessoal técnico. A principal desvantagem é que a sensibilidade da técnica é baixa, comprometendo a detecção de falhas ainda no estágio inicial.

Monitoração do espectro de frequência:

Esta é a principal técnica de detecção de falhas usando análise de vibração, principalmente após a sofisticação das técnicas e da instrumentação para análise espectral.

A análise espectral não identifica apenas a condição geral da máquina. Ela tem como objetivo apontar problemas específicos, sendo necessário investigar certas componentes de frequência, ou até mesmo, certos grupos de frequência.

O processo da análise espectral se inicia com a aquisição do sinal de vibração por intermédio de um acelerômetro. Este sinal, no domínio do tempo, será transformado para o domínio da frequência realizando-se uma FFT (Fast Fourier Transform). Já no domínio da frequência, analisa-se o sinal procurando pelos picos mais protuberantes que podem constituir um indicativo de falha de um elemento da máquina em particular.

D. MCSA Versus Vibração

A análise de vibrações é uma técnica de manutenção preditiva consolidada no meio industrial e que apresenta bons resultados. Contudo, algumas características inerentes a própria técnica clamaram pelo aparecimento de técnicas preditivas que pudessem complementar o potencial de detecção de falhas da análise de vibração. É justamente nesse contexto que surge a técnica de MCSA que, como poderá ser visto no tópico seguinte, trata-se de uma técnica relativamente nova, mas que contribui de forma bastante positiva no trabalho de equipes de manutenção preditiva no tocante a detecção de falhas em seus processos produtivos.

Os pontos mais críticos da análise de vibração são:

1. Necessidade de acesso ao motor: algumas vezes o motor está inacessível, por exemplo, em profundidade ou dentro de tubulações. Outras vezes os motores se encontram em locais de pouca segurança para o funcionário coletor de sinais, etc. A técnica de MCSA não precisa de acesso ao motor, mas apenas a coleta do sinal de corrente diretamente do painel de alimentação.

2. Detecção de falhas elétricas: como já era de se esperar, o diagnóstico de problemas de origem elétrica é mais difícil de ser realizado pela análise de vibrações. A figura 2.1 apresenta as partes da máquina e qual técnica, MCSA ou vibração, detecta com maior facilidade.

3. Diagnóstico na presença de inversores: a análise espectral do sinal de vibração fica bastante prejudicada quando da presença de inversores de frequência. Na corrente também há o prejuízo natural da qualidade espectral, porém com as ferramentas de estimação da velocidade e suporte ao diagnóstico propostos neste trabalho, essas dificuldades são minimizadas.

4. Necessidade de análise de vários sinais: na maioria das vezes o analista de vibração trabalha com sinais de vários acelerômetros instalados na máquina para se chegar ao diagnóstico do problema. Estes acelerômetros podem chegar ao total de nove ou mais nas posições horizontal, vertical e axial em dois ou três pontos do drive train. Já MCSA trabalha com apenas um sinal de uma das fases de corrente.

E. Princípios da Técnica de MCSA

MCSA é a técnica usada para analisar e acompanhar a tendência de sistemas energizados dinâmicos. A análise apropriada dos resultados da aplicação da técnica auxiliará a preditiva da planta na identificação de: problemas no enrolamento do estator, problemas rotóricos, problemas no acoplamento, problemas na carga acoplada, eficiência e carregamento do sistema, problemas no rolamento, entre outras.

Esta técnica usa o motor de indução como um transdutor, permitindo que o usuário avalie a condição elétrica e mecânica a partir do painel de alimentação e consiste basicamente na monitoração de uma das três fases da corrente de alimentação do motor. Um sistema simples e suficiente para a implementação da técnica é apresentado na Figura 1.

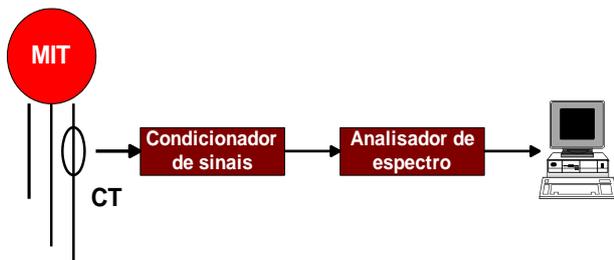


Figura 1: Sistema básico para análise espectral da corrente

Assim, o sinal de corrente de uma das fases do motor é analisado para produzir o espectro de corrente, normalmente referenciado como Assinatura da Corrente do Motor. O objetivo é obter tal assinatura para se identificar a magnitude e frequência de cada componente individual que constitui o sinal de corrente do motor. Isso permite que padrões na assinatura da corrente sejam identificados para diferenciar motores “saudáveis” de motores em falta e ainda detectar em que parte da máquina a falha deve ocorrer.

Entretanto, é importante ressaltar que o diagnóstico é algo extremamente complicado, ou seja, a definição de parar ou não o processo produtivo em virtude das indicações do espectro de corrente é sempre difícil e exige experiência e conhecimento do processo. Nessa hora, torna-se importante o conhecimento do especialista e de um histórico do comportamento do conjunto (motor, sistema de transmissão e carga). Por esta razão, um sistema de diagnóstico automático que alie o histórico do motor ao conhecimento do especialista encontra um nicho de mercado bastante promissor. Desta forma, o sistema de análise e diagnóstico automático já não é tão simples como o modelo apresentado na Figura 1 e pode ser representado conforme Figura 2.

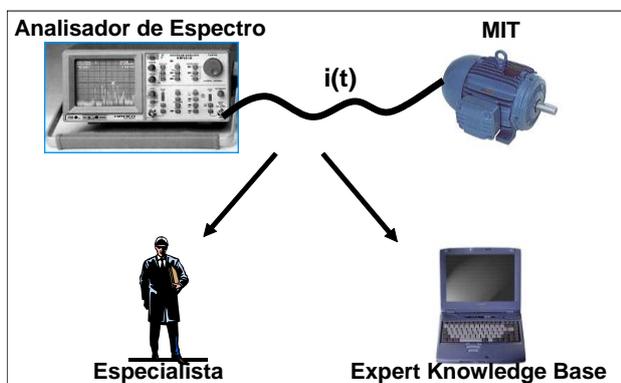


Figura 2: Integração de um sistema de diagnóstico automático

A transformada rápida de Fourier é a principal ferramenta empregada, contudo alguns sistemas empregam em conjunto outras técnicas para aumentar a capacidade de detecção de falhas desde a aquisição do sinal, passando pelo processamento, até a etapa de diagnóstico.

Dentre as questões mais importantes relacionadas a aquisição dos sinais e a FFT destacam-se:

1. Faixa de Frequência: a resposta em frequência normalmente necessária em MCSA é de 5kHz. Desta forma, a faixa de passagem dos transdutores utilizados deve ser de no mínimo 10 kHz.

2. Teorema de Nyquist: esse teorema afirma que para

representarmos um sinal qualquer para ser reconstruído sem perdas significativas devem ser retiradas amostras com o dobro da frequência máxima deste sinal. Na prática usa-se 10 vezes a frequência máxima e garante-se excelente precisão.

3. Resolução: a resolução espectral, ou seja, a distância entre duas raiais espectrais é dada por:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}$$

Onde:

Δf é a resolução espectral

f_s é a frequência de amostragem utilizada

N é o número de amostras

A resolução empregada em MCSA deve ser bastante alta para viabilizar a separação das componentes de interesse, principalmente na ocorrência de um escorregamento muito baixo. Comparando com os equipamentos existentes, a resolução do sistema desenvolvido como resultado deste trabalho apresenta-se bem superior, constituindo um dos grandes diferenciais do equipamento.

4. O uso da escala em dB: ao contrário da análise de vibração, MCSA utiliza a escala em dB para a análise da severidade da falha. A razão é muito clara, uma vez que a amplitude da componente fundamental da rede é muito maior que as amplitudes das componentes de falha, fica inviável a comparação entre essas frequências numa escala linear.

Outras questões importantes advêm da própria operação dos motores de indução. A primeira questão importante entre MCSA e a operação de motores de indução está relacionada à velocidade síncrona da máquina que é dada por:

$$N_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

Onde:

f_1 = frequência de alimentação

N_s = velocidade do campo girante

p = número de par de pólos

A partir da velocidade síncrona pode-se definir dois conceitos importantes para a análise da assinatura da corrente: a velocidade de escorregamento e o escorregamento. Em MCSA é importante ter sempre em mente que a velocidade rotórica é sempre menor que a velocidade síncrona. A frequência das correntes induzidas no rotor é função do escorregamento e da frequência de alimentação. Quando operando sem carga, o rotor gira numa velocidade bem próxima da velocidade síncrona. Na condição de operação a vazio, o torque deve ser apenas suficiente para vencer atrito e ventilação. A diferença entre a velocidade rotórica (N_r) e a velocidade síncrona (N_s) é chamada de velocidade de escorregamento (N_{slip}):

$$N_{slip} = N_s - N_r$$

Quando carga mecânica é acoplada ao rotor demandando torque, a velocidade rotórica diminui. Por sua vez, a velocidade do escorregamento aumenta e a corrente no rotor também para propiciar mais torque. À medida que a carga aumenta, o rotor continua tendo sua velocidade reduzida

com relação à velocidade síncrona. Este fenômeno é conhecido como ESCORREGAMENTO DO MOTOR. Assim:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Outra definição importante refere-se a frequência de escorregamento. A frequência induzida no rotor é corretamente definida como frequência do escorregamento e é dada por:

$$f_2 = (N_s - N_r) \cdot p$$

Como se observa, a frequência rotórica é diretamente proporcional a velocidade de escorregamento e ao número de par de pólos. Como:

$$s \cdot N_s = N_s - N_r$$

e

$$s \cdot N_s = f_1$$

Tem-se:

$$f_2 = s \cdot f_1$$

Esse é um resultado extremamente importante para MCSA uma vez que a frequência da corrente rotórica é função do escorregamento.

III. PADRÕES DE FALHA

A imensa maioria dos trabalhos publicados acerca da monitoração de falhas via análise espectral da corrente traz os padrões de falhas referente a barras quebradas e excentricidade do air-gap. Com relação a essa última falha, os artigos trazem, freqüentemente, a análise da frequência de rotação e apenas poucas vezes mencionam a possibilidade de separação dos efeitos entre excentricidade dinâmica e estática.

Este item apresenta uma contribuição significativa aos trabalhos anteriores uma vez que adiciona padrões inéditos de falhas relacionadas à carga acoplada, além de reunir e organizar todos os outros padrões já existentes. Todos os padrões de falha foram verificados, primeiramente em ensaios controlados de laboratório e, posteriormente, na prática, dentro de plantas industriais com processos críticos a serem monitorados.

Com o intuito de se organizar a apresentação dos padrões de falha, dividiu-se os mesmos em três grupos: falhas no motor, falhas no sistema de transmissão e falhas na carga acoplada.

Dessa forma, utilizando-se o motor como transdutor, pode-se monitorar o conjunto completo, motor mais carga acoplada, objetivando a maior confiabilidade do processo produtivo.

A. Falhas no Motor

Consideram-se falhas do motor as avarias ocorridas no estator, rotor ou no mancal. Na seqüência são apresentadas as assinaturas de corrente associadas à essas falhas e as informações mais relevantes acerca do processo de surgimento, agravamento e características peculiares das mesmas.

1. Barras Quebradas

A detecção de barras quebradas ou trincadas através do espectro da corrente do estator é feita observando-se duas componentes do espectro que se localizam próximas e em torno da componente fundamental.

Este tipo de falha ocorre normalmente na presença de esforços térmicos e mecânicos, cargas pulsantes, e imperfeições no processo de manufatura da gaiola. A quebra de barras não leva o motor imediatamente à falha, ou seja, a máquina pode continuar funcionando mesmo com a existência de barras quebradas ou trincadas. Contudo, efeitos secundários consideráveis podem ocorrer como, por exemplo, as barras quebradas atingirem o estator.

A quebra de barras faz com que apareçam no espectro de corrente dois picos igualmente afastados de $2 \cdot f \cdot s$ da componente fundamental, onde f é a frequência de alimentação e s é o escorregamento da máquina em pu. A componente da esquerda ($f - 2f_s$) é resultado direto da falha, enquanto que a componente da direita ($f + 2f_s$) é resultado do ripple de velocidade. Desta forma, pode-se afirmar que a quebra de barras resulta no aparecimento de componentes no espectro da corrente do estator nas frequências dadas por [2]:

$$f_{bq} = f \cdot (\pm k \cdot 2 \cdot s)$$

Onde:

f é a frequência de alimentação em Hz

s é o escorregamento da máquina em pu

$k = 1, 2, 3, \dots$

Considerando as duas componentes em questão, tem-se que a soma de suas amplitudes é um bom indicador da severidade da falha. Evidentemente, as conclusões tiradas, considerando-se a soma em questão, são empíricas. Outra forma de se monitorar a severidade da falha em questão é considerar a média das amplitudes do primeiro conjunto de bandas laterais (1ª banda lateral esquerda e 1ª banda lateral direita). A terceira maneira, que é adotada neste trabalho, é se considerar a pior condição, ou seja, toma-se a maior das amplitudes entre as duas componentes do primeiro conjunto de bandas laterais.

Pode-se ainda calcular o número de barras quebradas através da amplitude da banda lateral esquerda ($f - 2f_s$) que é proporcional ao número de barras quebradas. Essa fórmula é empírica e reflete o número de barras quebradas de forma aproximada. Seja a relação abaixo:

$$\frac{I_{bq}}{I_f} \cong \frac{\text{sen } \alpha}{2p \cdot (2\pi - \alpha)}$$

Onde:

I_{bq} é a amplitude da componente em ($f - 2f_s$)

I_f é a amplitude da componente fundamental

p é o número de par de pólos

E α é dado por:

$$\alpha = \frac{2\pi R_b p}{R}$$

Onde:

R_b é o número de barras quebradas

R é o número de barras do rotor

Deve-se ressaltar que se existem barras quebradas em várias partes do rotor, a análise em corrente muitas vezes não será capaz de propiciar o diagnóstico do problema. Ou seja, barras quebradas em regiões diametralmente opostas compensam o desequilíbrio elétrico e mecânico. Resulta daí que as observações feitas até agora são válidas para quebra de barras subsequentes.

Outra grande dificuldade do método é a possível confusão entre a real ocorrência de quebra de barra e a modulação da corrente produzida por outros eventos e que geram as mesmas componentes de interesse ou componentes muito próximas a $(f \pm 2f_s)$. Como exemplo pode-se citar oscilações de carga e processos que usam caixas de engrenagens para alta redução de velocidade.

Quando se almeja o diagnóstico da falha, o sistema de monitoração e diagnóstico deve considerar vários fatores como: diferentes projetos do rotor, diferentes condições de carga, características mecânicas da carga e componentes mecânicos do drive train.

Estas condições são importantes para garantir a confiabilidade do diagnóstico, cuja estratégia deve se iniciar com a aplicação de uma FFT de alta resolução para garantir o reconhecimento das componentes de interesse. Além disso, deve observar-se que o sistema de monitoração deve ser bastante dinâmico, se adaptando as variações da frequência de alimentação e do escorregamento, já que a variação no valor dessas duas variáveis altera a posição das bandas laterais no espectro.

Outro ponto de fundamental importância é a tomada de decisão após o diagnóstico de falha. Vários fatores devem ser levados em consideração, dentre eles: severidade da falha, importância estratégica do conjunto, projeto do rotor, potencial da falha secundária, ou seja, a falha que ocorrerá em função da quebra de barras, e segurança.

2. Excentricidade do air gap

Defini-se como excentricidade do air gap a condição na qual o air gap não apresenta uma distância uniforme entre o rotor e a superfície interna do estator resultando em uma região de air gap mínimo e outra de air gap máximo.

A equação que descreve a variação do tamanho air gap no tempo é função das excentricidades estática e dinâmica (conceitos a serem definidos no decorrer deste tópico) e dada por:

$$g(\theta, t) = g(1 - e_s \cos\theta - e_d \cos(\omega_r t - \theta))$$

Onde:

e_s é a excentricidade estática

e_d é a excentricidade dinâmica

As causas mais comuns de excentricidade do air gap são: imperfeição do processo de manufatura, rotor e eixo não concêntricos, núcleo do estator oval e empeno térmico do rotor. Antes de se evoluir para as formas de detecção da falha e seus padrões, torna-se necessário a caracterização dos dois tipos de excentricidade: a estática e a dinâmica.

Na excentricidade estática a posição do tamanho do air gap radial mínimo é fixa no espaço, o núcleo do estator é oval ou há um posicionamento incorreto do rotor ou estator gerado por um desalinhamento. Além dessas possibilidades ainda existem os aspectos construtivos que permitem um

nível intrínseco devido às tolerâncias do processo de produção.

Na excentricidade dinâmica o air gap mínimo gira com o rotor. As principais causas são: diâmetro externo do rotor não-concêntrico, empeno térmico do rotor, defeito no rolamento, desbalanceamento do rotor ou da carga.

Existem duas formas de se detectar a excentricidade do air gap utilizando-se o espectro da corrente do estator [3]. A primeira forma monitora as bandas laterais presentes no espectro de corrente em torno da frequência do slot. As frequências associadas à excentricidade do air-gap podem ser encontradas através da formulação abaixo:

$$f_{slot/exc} = f \cdot \left[\left(R \pm n_{ecc} \right) \pm \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \pm n_s \right]$$

Onde:

f = frequência elétrica de alimentação;

$k=1, 2, 3, \dots$

R = número de barras do rotor;

s = escorregamento da máquina em pu;

n_{ecc} (número da ordem da excentricidade) = 1, 2, 3, ...

p = número de pólos;

n_s (ordem da harmônica de alimentação) = 1, 3, 5, 7, ...

A grande desvantagem deste método é a necessidade de se conhecer aspectos construtivos da máquina como o número de barras do rotor. Em contrapartida, utilizando-se esta região do espectro para a monitoração tem-se a separação dos efeitos das falhas relacionadas à excentricidade estática e a dinâmica.

A outra forma de monitoração consiste em acompanhar o comportamento das bandas laterais em torno da componente fundamental. Estas frequências são dadas por:

$$f_{exc} = f \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \right]$$

Onde: $m = 1, 2, 3, \dots$

A vantagem do método está justamente no fato de não se precisar conhecer os aspectos construtivos da máquina para se fazer uma avaliação da saúde do motor com relação a este tipo de falha.

Com relação a severidade da falha tem que os fabricantes se esforcem para manter a excentricidade dentro de uma faixa mínima. Alguns estabelecem um nível máximo permitido de 5% de excentricidade enquanto que em outros casos permite-se até 10%. É válido ressaltar que a excentricidade do air gap especificada pelo fabricante é a excentricidade do air gap radial, ou seja, estática mais dinâmica.

Em grandes motores de indução trifásicos, um nível de excentricidade de 25 a 30% pode ser considerado severo.

3. Falhas no Enrolamento do Estator

A maior parte das avarias relativas ao estator de motores de indução encontra-se associadas aos respectivos enrolamentos, representando a ocorrência de avarias localizadas no núcleo ferromagnético estático um acontecimento bastante menos freqüente. Contudo, apesar de pouco freqüentes, essas últimas podem causar danos consideráveis nas máquinas por elas afetadas [4].

As avarias associadas aos enrolamentos do estator

apresentam um conjunto diversificado de manifestações possíveis, podendo ainda verificar-se a ocorrência simultânea de diversas combinações.

Outra forma de se monitorar problemas no estator é através do padrão que leva em consideração no número de ranhuras do estator e a velocidade de rotação do motor.

4. Rolamento

A monitoração das falhas no rolamento é de suma importância em um sistema de manutenção preditiva, pois estudos indicam que cerca de 40% de todas as falhas em máquinas se devem a problemas nestes elementos [5]. Muitos trabalhos têm sugerido a monitoração da corrente do estator para propiciar as mesmas indicações de falhas que a análise de vibração, trazendo como benefício principal em relação a esta última técnica a não necessidade de acesso ao motor.

Diversas são as causas de falhas em rolamentos. Além do processo normal de falha, isto é, o aparecimento de pequenas fissuras abaixo da superfície das pistas e elementos rolantes, existem outras condições que contribuem para a redução do tempo de falha do rolamento. Essas condições são fontes externas como corrosão, contaminação, lubrificação imprópria, instalação imprópria, etc. Seja uma breve descrição de cada uma dessas condições [6]:

Contaminação: o processo de contaminação se dá através de pequenas partículas de natureza abrasiva e dureza variável que frequentemente contaminam a lubrificação do enrolamento, causando ações de pitting e sanding.

Corrosão: o processo de corrosão é iniciado devido à presença de água, ácido, lubrificação deteriorada, etc. Com o avanço do processo de corrosão, partículas são expelidas resultando na mesma ação abrasiva da contaminação.

Lubrificação imprópria: lubrificar em falta ou em excesso faz com que os elementos rolantes não girem corretamente no filme de óleo causando aquecimento. Esse aquecimento deteriora a graxa, diminuindo a lubrificação e acelerando o processo de falha.

Problemas na instalação: as falhas originadas por instalação imprópria são causadas por forçar o rolamento contra o eixo ou contra a carcaça, resultando em danos físicos ao rolamento. Outro problema comum gerado por instalações incorretas é o desalinhamento do rolamento.

Estabelecidas as causas de falhas em rolamentos, torna-se importante o conhecimento do efeito dessas falhas no espectro da corrente do estator. As frequências características do rolamento são bem conhecidas e suas formulações baseadas nas dimensões do rolamento. As falhas em rolamentos dividem-se em falhas no elemento girante, na gaiola e nas pistas interna e externa.

Cada parte componente apresenta componentes de frequência específicas que podem ser calculadas através das formulações que serão apresentadas adiante. Contudo é mais comum obter essas frequências de tabelas fornecidas pelos fabricantes.

B. Falhas no Sistema de Transmissão

A análise da assinatura da corrente monitora as componentes relativas às polias (motora e movida), correia e

engrenagens. Já foi observado que problemas na carga podem repercutir nas frequências dos elementos do sistema de transmissão, sendo essa mais uma forma de inferir sobre falhas na carga acoplada além das componentes características da própria carga.

1. Polias

Através da análise da frequência de rotação pode-se detectar problemas relacionados à polia motora. Caso o acoplamento com a carga seja direto não é possível se distinguir qual é a polia em processo de falha uma vez que ambas giram na mesma frequência de rotação. Havendo uma transformação de velocidade, pode-se monitorar a polia movida e a carga acoplada.

Os problemas encontrados mais frequentemente são de polia excêntrica, polia com folga e desbalanceamento. Problemas relativos à carga acoplada também aparecem na mesma frequência, cabe ao analista cruzar informações de outras regiões do espectro para chegar a uma conclusão. Pode acontecer também de se suspeitar de problemas em duas ou mais partes do drive train.

2. Correia

O primeiro passo para a monitoração das componentes espectrais características da correia é o cálculo da frequência da correia. Obtido este valor, basta seguir o padrão apresentado e acompanhar a curva de tendência da falha em questão. Além de se poder diagnosticar problemas como correia frouxa, rachada, ou esticada em excesso, pode-se também analisar problemas oriundos na carga e que aumentam a vibração na correia contribuindo para o aumento da amplitude dessas componentes.

3. Engrenagem

No caso de engrenagens, têm-se duas regiões para monitoração no espectro. A primeira, em frequências mais baixas, traz informações relativas às falhas localizadas (por exemplo, dente quebrado) nas engrenagens. Estas frequências estão relacionadas com as frequências de rotação do conjunto antes ou depois da transformação de velocidade. Já a segunda região de interesse no espectro traz informações relativas às falhas distribuídas nas engrenagens, sendo conhecidas como frequências do engrenamento e calculadas pela multiplicação da velocidade de rotação do eixo pelo número de dentes da engrenagem.

C. Falhas na Carga Acoplada

O surgimento e o agravamento das avarias na carga podem ser sentidos pelo sistema de transmissão e pelo próprio motor. A intensidade com que o motor vai “sentir” esses efeitos depende do tipo de acoplamento que é utilizado, ou seja, acoplamentos elásticos fazem com que os efeitos cheguem atenuados ao motor, que tanto para avaliação do sistema de transmissão quanto para a carga acoplada, atua como um transdutor para a análise da assinatura da corrente.

1. Bombas

A análise de falhas em bombas de palhetas é feita

considerando-se a frequência de rotação da bomba e a frequência de passagem das palhetas. Além dessas frequências, deve-se monitorar também o aumento de saliências próximas da frequência da rede que são características da assinatura de bombas e indicam cavitação.

A análise da frequência de rotação da bomba indica problemas relacionados à desalinhamento ou desbalanceamento da bomba. Já o aumento das amplitudes das frequências de passagem das palhetas indica defeitos no interior da bomba como deterioração das pás. A Figura 3 apresenta as frequências características de falhas em bomba.

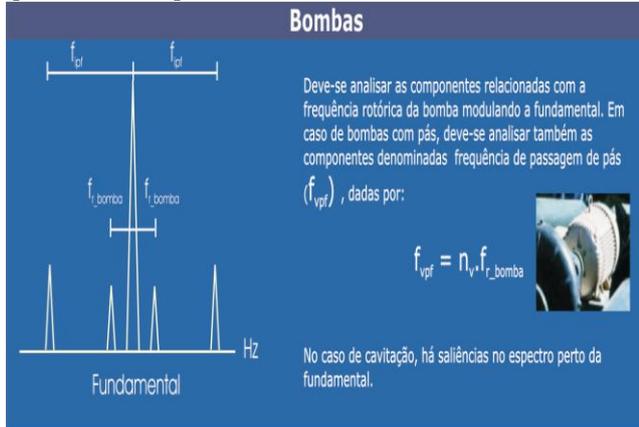


Figura 3: Padrão de falhas em bombas de palhetas

Já a questão relativa à cavitação pode ser mais bem entendida pelo espectro real apresentado na Figura 4.

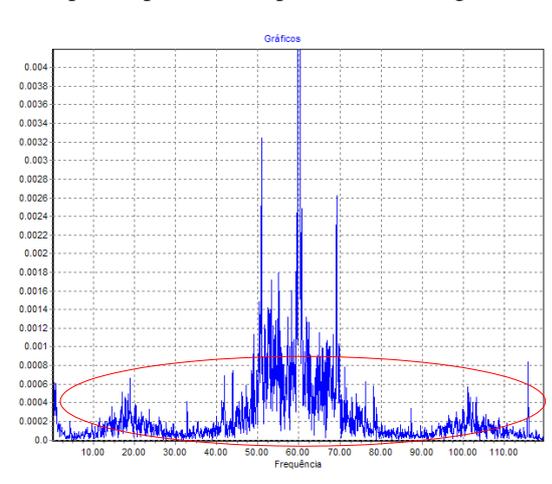


Figura 4: Assinatura característica de cavitação em bombas

Na ocorrência de cavitação, estas saliências se tornam ainda mais pronunciadas apontando para o problema. Desta forma, é importante que se tenha um baseline, ou seja, um espectro de referência com o motor e bomba em bom estado para futuras comparações quando da ocorrência de efeitos indesejados.

2. Compressores a Parafuso

O conjunto completo motor-engrenamento-compressor pode ser monitorado através da assinatura da corrente do motor de forma bastante satisfatória. O motor e o engrenamento podem ser analisados segundo os padrões apresentados anteriormente. Já a análise do compressor leva em consideração três frequências características desta carga:

a frequência de rotação do parafuso macho, a frequência de rotação da fêmea e a frequência de rotação.

A Figura 5 apresenta as partes constituintes de um compressor a parafuso, as fórmulas para cálculo das frequências características e o padrão espectral das partes do compressor.

Para os compressores a parafuso de dois estágios, basta aplicar o mesmo raciocínio para o segundo estágio de compressão. Como as relações de ampliação de velocidade são diferentes, ter-se-á diferentes componentes de frequência para cada um dos estágios de compressão.

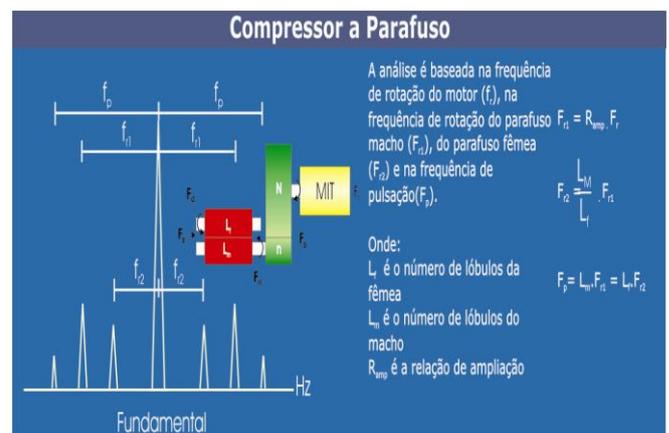


Figura 5: Padrão de falha de Compressores a Parafuso

IV. O SISTEMA DE MONITORAÇÃO

O sistema de monitoração segue o diagrama apresentado na Figura 6. Neste sistema, têm-se os transdutores que convertem as grandezas tensão e corrente em sinais de tensão compatíveis ao hardware, e este filtra, amplifica, transforma o sinal analógico em digital e depois transmite para um microcomputador para análise. No microcomputador é empregado um programa de análise para realizar, além do gerenciamento dos dados, o processamento dos sinais aplicando as ferramentas matemáticas inerentes a cada uma das técnicas. Por exemplo, as transformações do domínio do tempo para a frequência, o cálculo do vetor de Park, as gerações das tendências além de outros recursos que são necessários ao diagnóstico.

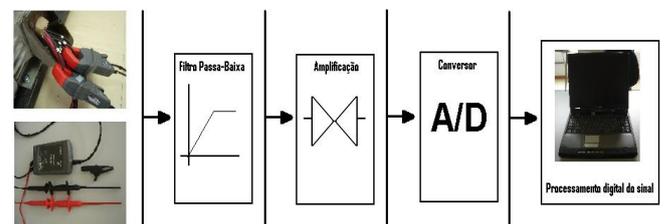


Figura 6: Sistema de monitoração para aplicação das técnicas de análise de falhas elétricas

V. EXEMPLO DE MONITORAÇÃO EM MOTORES DA TERMOPE

Um dos motores que foram monitorados pelo sistema desenvolvido foi o MGR 710L, que tem a função de ser um motor da bomba de água do mar. A Figura 7 mostra os dados do motor sob análise, bem como as interfaces do programa computacional desenvolvido.

Fabricante		Modelo do motor	
WEG		MGR 710 L	
Potência [CV]	Frequência [Hz]	Rotação Nominal [rpm]	
1902.17	60	509	
Tensão [V]	Corrente Nominal [A]	Corrente de Partida [A]	
4000	275	-	
Número de Pólos	Nº Barras do Rotor	Nº Ranhuras do Estator	
14	102	126	
Tipo de Carcaça	Classe de Isolamento	Fator de Potência	
710	-	-	
Fator de Serviço			
-			

(a)

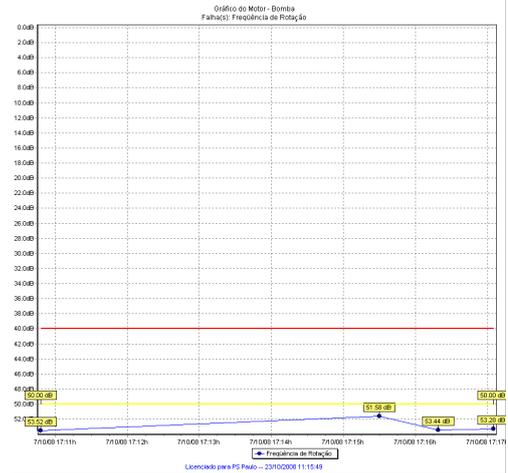
Rolamento do Acoplamento			
Fabricante		Modelo do Rolamento	
SKF		29352E	
BPFI	BPFO	BSF	FTF
12.4800	10.5200	3.7100	0.4600
Rolamento Oposto ao Acoplamento			
Fabricante		Modelo do Rolamento	
SKF		16060	
BPFI	BPFO	BSF	FTF
9.3500	7.6500	4.9400	0.4500

(b)

Figura 7: Dados do motor MGR 710L

Nesta análise busca-se identificar avarias relacionadas a problemas mecânicos oriundos de excitações dinâmicas no motor, sistema de transmissão e carga acoplada. Busca-se também monitorar a condição do rotor através da detecção de barras quebradas ou pontos de alta resistência elétrica.

A) Frequência de Rotação: indica problemas relacionados à excentricidade do airgap como desalinhamento e desbalanceamento mecânico. Reflete também folgas e problemas de travamento de eixo em função de avarias no rolamento. Os níveis de amplitude vão para a curva de tendência onde será acompanhada a evolução das avarias do motor. Nessa medição os níveis estavam em torno de 53 dB, conforme mostrado na Figura 8.



(b)

Figura 8: Componentes relacionadas à rotação do motor e curva tendência

Vale observar também que as demais bandas laterais harmônicas também apresentam amplitudes bem características no espectro. Seja o espectro mostrado na Figura 9 destaca todos os cinco primeiros pares de bandas laterais da frequência de rotação do motor MGR 710L.

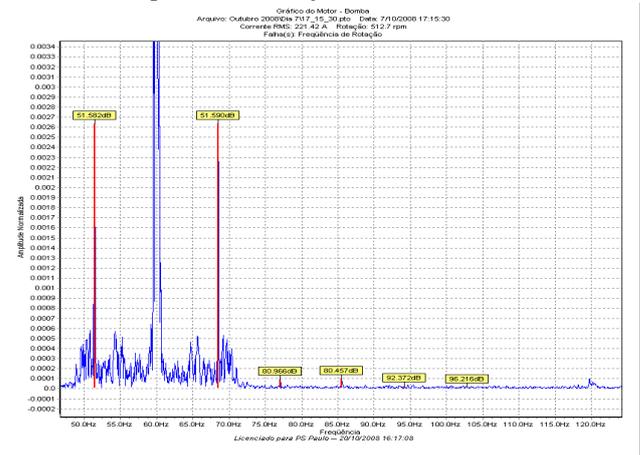
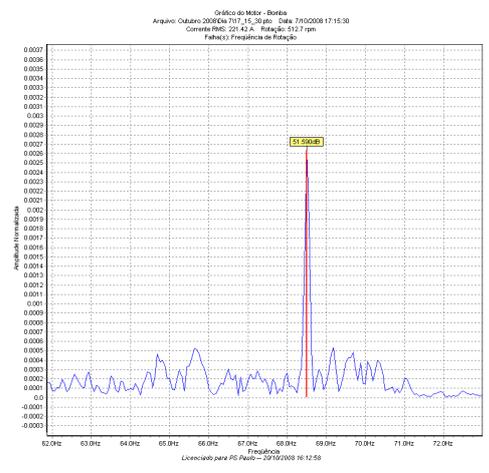


Figura 9: Componentes relacionadas à rotação do motor

B) Barras quebradas: o rotor apresenta-se em condições normais. O primeiro par de bandas laterais apresentou amplitudes em torno de 51 dB. Por se tratar de um motor de 14 pólos, temos as componentes de barras quebradas muito próximas à fundamental, sendo assim usa-se uma frequência de amostragem inferior para melhor visualização deste tipo de falha, conforme Figura 10.



(a)

identificar a magnitude e frequência de cada componente individual que constitui o sinal de corrente do motor. Isso permite que padrões na assinatura da corrente sejam identificados para diferenciar motores "saudáveis" de motores em falta e ainda detectar em que parte da máquina a falha deve ocorrer.

Por fim, um cadastro organizado com os dados construtivos do motor, sistema de transmissão e carga e histórico de manutenções são de fundamental importância para um sistema de manutenção preditiva.

REFERÊNCIAS

- [1] E.L. Bonaldi, L.E.L. Oliveira, L.E. Borges da Silva & G. Lambert-Torres - "Reducing the Downtime Cost in the Brazilian Refineries through the Remote Induction Motor Health Monitoring and Induction Motor Management", 22nd International Congress on Condition Monitoring and Diagnosis Engineering Management, COMADEM 2009, San Sebastian, Espanha, 9 a 11 de Junho de 2009.
- [2] L.E. Borges da Silva, G. Lambert-Torres, D.E Santos Jr., E.L. Bonaldi, L.E.L. Oliveira & J.G. Borges da Silva - "An Application of MSCA on Predictive Maintenance of TermoPE's Induction Motors", 3rd International Congress University-Industry Cooperation, UNINDU 2008, Ubatuba, Brasil, 7 a 10 de Dezembro de 2008.
- [3] W.T. Thomson - "Condition Monitoring of Induction Drives". Virginia, Spectra Quest 2002.
- [4] A.J.M.Cardoso - "Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos". Coimbra Editora, 1991.
- [5] M. E. Steele, R.A. Ashen, and L.G. Knight - "An Electrical Method for Condition Monitoring of Motors"; International Conference on Electrical Machines – Design and applications, IEE Conference Publication Number 213, pp. 216-220, 13-15 July 1982.
- [6] G.B. Kliman, R.A. Koegl, J. Stein, R.D. Endicott, and M.W. Madden - "Noninvasive Detection of Broken Rotors Bars in Operating Induction Motors"; IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. EC-3, pp. 873-879, December, 1998.