



V SBQEE  
Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica  
17 a 20 de Agosto de 2003  
Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 04 111  
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

## AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO: MINIMIZAÇÃO DAS PARADAS DAS UNIDADES DE REFINO DE PETRÓLEO

Luiz Alberto Fernandes Valle  
PETROBRAS S.A.

Dilermando Alberto Ragone Lopes  
PETROBRAS S.A.

Edmundo Gonçalves de Jesus  
PETROBRAS S.A.

### RESUMO

Numa refinaria de petróleo as diversas unidades de processamento operam continuamente. Para tal, é fundamental o fornecimento ininterrupto de energia elétrica a estas unidades. Os afundamentos momentâneos de tensão causados por curto-circuitos e reacelerações de motores podem acarretar paradas de unidades devido ao desligamento de equipamentos elétricos sensíveis a essas anormalidades. O nosso trabalho se desenvolveu em duas linhas de ação. A primeira cuidou da sensibilidade dos equipamentos críticos sujeitos aos afundamentos enquanto que a segunda cuidou dos sistemas frente aos afundamentos no sentido de manter a continuidade de serviço.

### PALAVRAS-CHAVE

Afundamentos de tensão, qualidade da energia, continuidade operacional, reaceleração de motores.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Numa refinaria de petróleo as diversas unidades de processamento operam continuamente, sendo supridas das utilidades necessárias ao seu funcionamento (água, vapor, gás e combustível, ar comprimido e energia elétrica). A interrupção do fornecimento de forma abrupta pode ocasionar a parada da unidade sem as utilidades importantes para uma parada

segura (falta de água de refrigeração, vapor, ar para instrumentos, etc).

Os afundamentos momentâneos de tensão [1] devidos aos curto-circuitos, tanto internamente à refinaria nos seus circuitos de distribuição (13,8kV) para as unidades de processo quanto ocorridos no sistema elétrico da concessionária, podem acarretar paradas de unidades devido ao desligamento de equipamentos elétricos sensíveis a estas anormalidades. O efeito deste afundamento momentâneo de tensão pode equivaler a uma falta completa no fornecimento de energia elétrica se os equipamentos elétricos essenciais à operação não continuarem em serviço devido ao desligamento dos contatores ou conversores de frequência ou interrupção de funcionamento de “no-breaks”, dentre outros problemas. Essas paradas de unidades podem acarretar grandes perdas operacionais gerando perdas financeiras elevadas tornando importante a tomada de ações para minimizar esses efeitos danosos.

Foram realizados trabalhos em duas linhas de ação: diminuição da sensibilidade aos afundamentos momentâneos de tensão dos equipamentos críticos e adequação do sistema para manutenção da continuidade operacional.

Na primeira linha apresentaremos os testes e alterações nos circuitos de comando para que contatores de motores elétricos sejam mantidos fechados mesmo durante o afundamento momentâneo e que esta manutenção dos contatores fechados não resulte em maiores problemas para o sistema elétrico tal como um novo afundamento gerado pela corrente de

reaceleração dos motores. Apresentaremos também as possibilidades de parametrização disponíveis em conversores de frequência para que suportem os afundamentos de tensão.

Na segunda linha de ação apresentaremos os estudos necessários e soluções incorporadas ao sistema para manter a continuidade operacional.

## 2.0 - O AFUNDAMENTO DE TENSÃO. OS NOSSOS PROBLEMAS

Em função do uso de um maior número de equipamentos mais sensíveis a perturbações da tensão tais como contadores com comando em corrente alternada, microprocessadores, controladores de processos, de equipamentos que causam perturbações no sistema tais como conversores de frequência, de uma exigência maior dos consumidores e de grandes implicações em segurança e custo, houve recentemente um aumento do interesse na qualidade da energia elétrica [2]. Dentre as perturbações citamos os afundamentos de tensão que podem causar a parada total de unidades de processamento contínuo existentes em refinarias de petróleo. Citamos os seguintes casos ocorridos em refinarias de petróleo:

a) Uma descarga atmosférica ocorrida dentro da Refinaria A, provocou uma sobretensão em seu circuito de distribuição de 13,8 kV. Essa sobretensão provocou um curto-circuito em uma chave a óleo acarretando afundamento de tensão em diversos alimentadores e como consequência houve o desligamento de contadores e conversores de frequência e a parada de diversas unidades de processo. (figura 1)

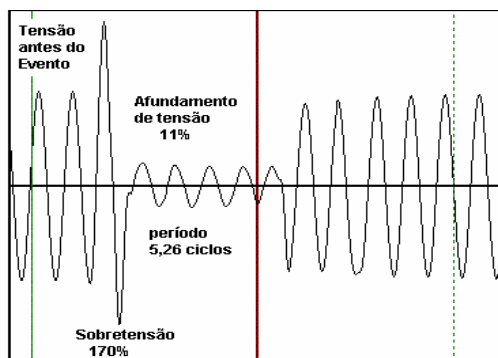


Figura 1 – Afundamento de tensão devido perturbação interna

b) Um curto-circuito na linha de transmissão de 138 kV que alimenta a Refinaria B, provocou afundamento de 50% na rede interna da refinaria com desligamento de contadores e conseqüente parada de unidades de processamento. (figura 2)

Os afundamentos de tensão são tipicamente causados por faltas. Essas faltas tanto podem

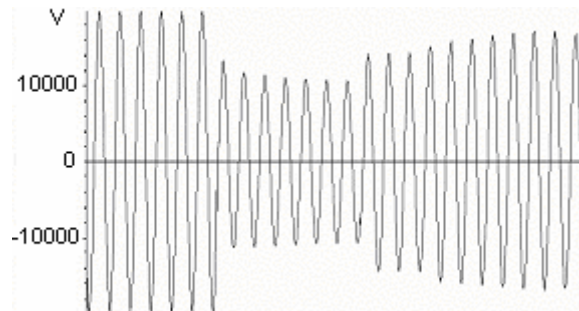


Figura 2 – Afundamento de tensão devido perturbação externa.

ocorrer no sistema da concessionária que alimenta a refinaria como no próprio sistema de distribuição interno. Uma outra causa dos afundamentos de tensão são as partidas de motores. No caso de faltas externas deve ser feito um estudo da área de vulnerabilidade, que é a região das linhas da concessionária onde ocorrendo um curto-circuito, pode ser afetada a planta industrial [3]. De posse desses estudos deve ser contatada a concessionária para tomada de ações conjuntas. Um investimento financeiro pela própria indústria pode ser compensado pelo retorno na melhoria da qualidade da energia com redução dos custos de perdas.

No âmbito interno, medidas preventivas para a redução da ocorrência de curto-circuitos tais como maiores esforços na manutenção preventiva, barreiras à entrada de animais em subestações, melhorias nas especificações de projeto, etc. devem ser tomadas.

A estratégia gerencial adotada, para solução dos problemas de afundamento foi a seguinte:

- capacitação dos nossos técnicos através de cursos com entidades reconhecidas e participação em seminários tanto no Brasil quanto no exterior;
- formação de grupos de estudos envolvendo os equipamentos, o sistema industrial e a interconexão com a concessionária. Reuniões foram feitas nas diversas unidades que sofreram com os afundamentos no intuito de assimilar as boas práticas locais.

## 3.0 - EQUIPAMENTOS ESTUDADOS

Dentre os equipamentos / sistemas críticos, sujeitos aos afundamentos de tensão, estudamos os conversores de frequência e os circuitos de comando e proteção de motores.

### 3.1 Conversores de Frequência

Em função da eletrônica envolvida, os conversores de frequência são muito sensíveis aos afundamentos. A maioria dos conversores desliga com subtensões de duração de poucos ciclos, não significando necessariamente uma

interrupção do processo. O importante é como o conversor reage à volta da tensão.

Após o desligamento, na volta da tensão, os conversores podem ser religados imediatamente, religados após temporização e religados manualmente. Portanto é fundamental conhecer as necessidades / limitações do sistema elétrico e do processo e também os recursos do conversor.

Os nossos maiores problemas eram os freqüentes desligamentos com necessidade de religamento manual com conseqüente parada de produção pois estes religamentos ocorriam num tempo incompatível com a continuidade operacional. Tínhamos então dois problemas básicos:

- Comportamento dos conversores frente aos afundamentos.
- Religamento do conversor na volta da tensão.

Após visitas e testes com fabricantes concluímos que, de uma maneira geral, os conversores de freqüência atuais apresentam funções que satisfazem as nossas condições de processo. Sua capacidade de operar durante afundamentos momentâneos, o chamado "ride-through", deve ser parametrizada pelo usuário de forma atender as condições específicas do processo. A figura 3 mostra a atuação típica do "ride through" de um conversor. Percebe-se que, durante a subtensão, o motor não é alimentado mas quando a tensão retorna, dentro de um determinado tempo, o motor volta a ser acionado. É de grande importância que todos os recursos do conversor, incluindo as parametrizações corretas, sejam bem conhecidas pelo usuário. Para isso é de fundamental importância que haja um treinamento na recepção destes equipamentos.

Na especificação de compra de um conversor de freqüência é importante exigir que o conversor mantenha os seus circuitos de controle eletrônicos ativos durante o período do afundamento momentâneo de tensão e cessado o afundamento, o conversor de freqüência deverá ser capaz de reassumir o controle da rotação do motor sem que haja a necessidade de um comando de partida remoto ou manual.

Caso a alimentação dos conversores de freqüência seja realizada através de contadores, cuidados deverão ser tomados para que estes não abram durante afundamentos de tensão.

### 3.2 Comando e Proteção de Motores

Nas nossas refinarias, são utilizados os seguintes tipos de comando de motores:

- Contadores eletromecânicos alimentados por corrente alternada.

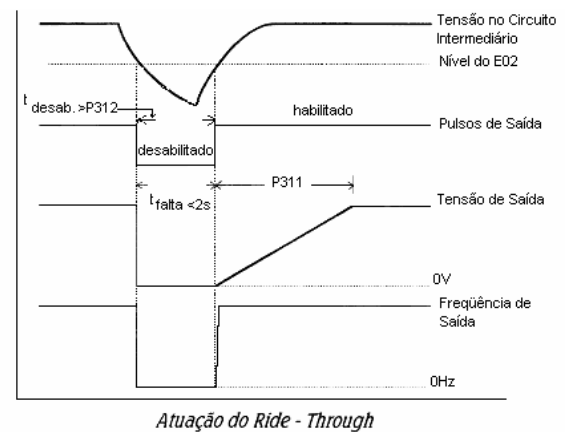


Figura 3 – Atuação do "ride through" de um conversor típico. Modelo WEG

- Contadores eletromecânicos alimentados por corrente contínua.
- Disjuntores.

Durante o trabalho foi possível identificar que o elemento sensível aos afundamentos de tensão é o contator eletromecânico, quando o comando deste é alimentado por redes sujeitas aos afundamentos. Testes mostram que subtensões de 70% com duração de poucos ciclos ocasionam a abertura dos contatores [4],[5].

Os afundamentos de tensão são influenciados quando há a presença de motores. Não considerando a carga, a tensão cai imediatamente para um valor devido ao curto-circuito. Quando a falta é limpa, a tensão restabelece imediatamente. Havendo motores, durante a falta, a tensão nos terminais do motor cai, o fluxo magnético no entreferro decai com uma constante de tempo de alguns ciclos, o motor contribui para a falta ajudando a manter a tensão no barramento. Por outro lado, o conjugado do motor cai com o quadrado da tensão, o motor desacelera solicitando uma corrente maior com conseqüente queda da tensão. Com a tensão restabelecida, há uma corrente maior para restabelecer o fluxo magnético e reacelerar o motor. Há, então, uma extensão do afundamento pós-falta [6]. A figura 4 mostra o comportamento típico da tensão em uma barra, durante um afundamento de tensão, influenciado pela presença de motores.

Uma característica importante dos motores de indução trifásicos é que eles continuarão a rodar e produzir conjugado quando houver falta de uma fase ou redução do módulo da tensão de uma ou mais fases. O motor rodará com velocidade e conjugado menores mas continuará a fornecer energia à carga. Por outro lado, quando o motor é desconectado da rede, o conjugado desenvolvido vai a zero e o motor desacelera rapidamente. Os motores reagem igualmente durante os afundamentos de curta duração como reduções

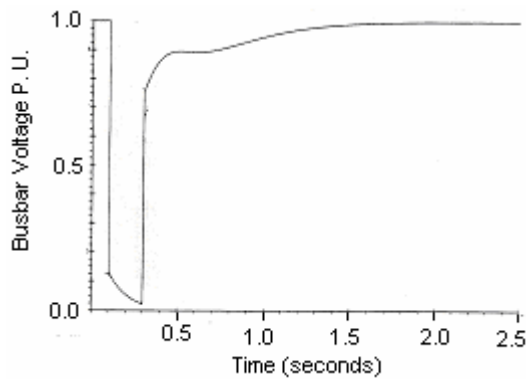


Figura 4 – Afundamento de tensão influenciado pelos motores (extraído de [6])

de tensão em regime permanente ou falta de fase. A diferença é que os afundamentos duram poucos ciclos e quando a tensão retorna ao normal, os motores reaceleram normalmente [7].

No caso do comando de contadores em corrente alternada, alimentado pela rede sujeita aos afundamentos, a configuração freqüente é o contador caindo durante a perturbação, há o religamento após a volta da tensão e a reaceleração dos motores pode ser crítica. Vemos, então, que manter os motores conectados durante um afundamento pode minimizar o efeito da perturbação no sistema [8]. A tensão gerada pelos motores conectados à rede ajuda a manter a tensão no sistema. Exemplos mostram que manter todos os motores de média tensão conectados proporciona um significativo suporte de tensão. A literatura recomenda que a duração do afundamento deve ser limitada em 10 ciclos .

### 3.3 Visitas e Testes Realizados

Nos testes com conversores de freqüência, foi verificada a importância da habilitação do controle vetorial em termos de Qualidade de Energia e de continuidade operacional em casos de afundamentos de tensão, em contraste ao sistema de controle escalar, o qual requer que seja considerado um tempo morto para decaimento do fluxo magnético do motor, tempo este que pode levar o processo a um estado de desligamento. Conforme verificado no laboratório da empresa visitada, em muitos casos, o menor tempo de retomada de controle propiciado pelo controle vetorial pode evitar a parada de uma unidade de processo.

O controle ideal de um conversor é aquele que permite que após o início da subtensão , o fluxo de energia link DC do inversor para o motor seja revertido. Nesta situação , a própria inércia do conjunto motor-carga contribuirá para retardar a queda completa do nível do link DC , e portanto a eletrônica permanecerá energizada e sincronizada em tensão , freqüência e fase com o

motor. Quando da normalização da tensão de entrada evita-se assim a sobrecorrente.

Em relação ao comando de motores foram realizados testes com contadores de baixa tensão com bobinas em corrente contínua alimentadas por circuitos retificadores os quais suportaram um grande nível de afundamento de tensão. A figura 5 mostra os testes de abertura e fechamento realizados com esses contadores e a tabela 1 mostra os resultados de um determinado fabricante. Outras soluções estão sendo estudadas tais como a inclusão de circuitos RC no circuito de controle no sentido de manter o contador fechado durante um determinado tempo[9].

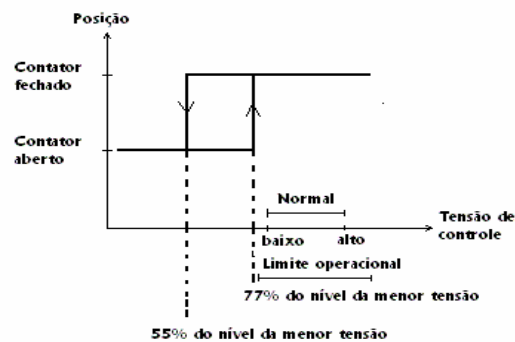


Figura 5 – Testes realizados com contadores

Tabela 1 – Resultados dos testes de abertura e fechamento de contadores

| Tensão nominal aplicada | Percentual da tensão na abertura do contador | Percentual da tensão no fechamento do contador |
|-------------------------|--|--|
| 120 V                   | 55 %   | 77 %   |

### 4.0 - SOLUÇÕES NO SISTEMA

A outra linha estudada foi a da adequação do sistema elétrico frente aos afundamentos no intuito de manter a continuidade operacional. As soluções a serem implantadas no sistema elétrico das subestações de processo constituem-se em estudos para realização de reaceleração de motores após a ocorrência de um afundamento de tensão ou após uma transferência automática. Em ambos os casos, procura-se evitar que as altas correntes que ocorrem durante a reaceleração dos motores e consequentes afundamentos na tensão não acarretem desligamentos indesejados.

Para manter a continuidade de serviço, uma técnica usada é a transferência automática entre fontes: passa-se da fonte em operação que sofre interrupção, para uma fonte de espera [10],[11]. A figura 6 mostra uma configuração típica. A alimentação da subestação é transferida da barra 1 para a barra 3, no caso de perda da

alimentação vinda da barra 1. Quando há a abertura do disjuntor do alimentador vindo da barra 1, os motores situados na barra A desaceleram, contribuindo para manter uma tensão nessa barra. O decaimento dessa tensão tem uma constante de tempo em função da carga combinada dos motores.

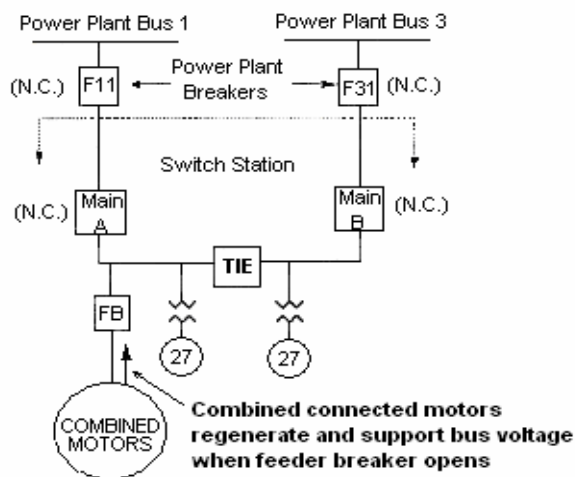


Figura 6 – Transferência automática. (extraída de [10])

A figura 7 mostra o comportamento da tensão nos terminais e do ângulo de fase, em relação ao sistema, de um motor de indução de 6000 hp, com carga de alta inércia, após desligamento da fonte. Vemos que a tensão leva cerca de 40 ciclos para atingir 50% do valor inicial. Com isso, o fechamento do disjuntor de transferência, figura 6, terá que ser feito levando-se em conta este decaimento. No fechamento desse disjuntor, a tensão resultante na barra será a diferença entre a tensão da rede e tensão dos motores.

Dependendo do instante do fechamento, a tensão resultante poderá atingir valores maiores que a tensão da rede provocando correntes de partida maiores que a corrente normal de rotor bloqueado e também conjugados que podem causar danos aos motores[12].

Uma técnica tradicional é o da tensão residual. Espera-se um determinado tempo até que a tensão residual na barra caia a um valor seguro de tal modo que a tensão resultante na barra não provoque correntes e conjugados elevados aos motores. Esse valor seguro de tensão residual se situa entre 20 a 25% da tensão da barra.

Uma outra técnica utilizada, para manter a continuidade de serviço, é a da reaceleração de motores [13]. Consiste em religar automaticamente, numa seqüência e prioridade pré-determinadas, alguns motores pré-selecionados, após uma interrupção ou afundamento de tensão. Os motores a serem reacelerados são agrupados em "steps" a fim de

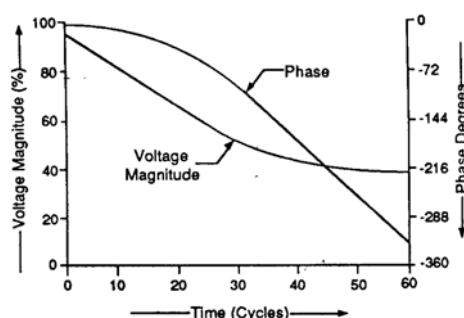


Figura 7 – Grandezas na barra do motor desconectado. (extraído de [11])

evitar atuações indesejáveis da proteção durante a reaceleração.

#### 4.1 A Reaceleração de motores

A estratégia utilizada foi uma priorização das unidades que receberiam estes estudos. Foram identificadas, então, as unidades de utilidades (fornecem vapor, energia elétrica, ar comprimido), unidades de destilação atmosférica e unidades de craqueamento catalítico para realização dos estudos e implantação das soluções. Os motores destas unidades foram, então classificados conforme abaixo:

- Motores que afetam a segurança
- Motores que reduzem a carga da unidade
- Motores que permitem a circulação do produto na unidade
- Motores que tiram o produto de especificação
- Motores que podem parar por um maior tempo

Os motores críticos para a operação da unidade receberão em seus circuitos de comando e proteção dispositivos que mantenham o motor recebendo energia elétrica mesmo durante afundamento momentâneo de tensão. Os demais motores terão o suprimento de energia elétrica interrompido durante o tempo necessário para redução da tensão residual em seus terminais e programas de reaceleração residentes nos sistemas digitais de controle distribuído realizarão a reaceleração dos motores segundo a classificação acima com um tempo máximo de ativação. De posse destes dados, os motores foram agrupados e a seqüência de reaceleração dos motores foi estudada em programas de simulação dinâmica. Estes estudos verificavam a tensão no sistema durante a reaceleração dos motores para curto-circuitos em vários pontos do sistema elétrico de distribuição. Os critérios de aceitação são:

- A menor tensão no barramento que alimenta o motor a ser reacelerado deverá ser maior que 85% da tensão nominal.



- O tempo máximo de espera para reacelerar, que é o tempo que o sistema esperará para iniciar a reaceleração. É determinado pela unidade de processo, sendo da ordem de segundos.
- O tempo entre steps deverá ser otimizado na simulação e em testes de campo. É o tempo suficiente para as tensões no sistema voltarem aos valores aceitáveis e a reaceleração de motores ser bem sucedida. Valores típicos de até 10 segundos.

A figura 8 mostra o comportamento da corrente e da tensão em um estudo típico de reaceleração de motores, usando um programa de simulação dinâmica.

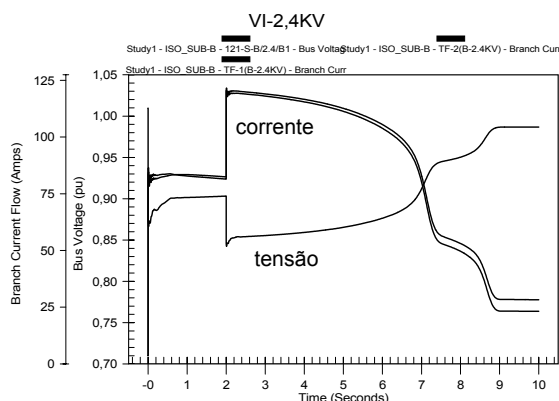


Figura 8 – Estudo de reaceleração de motores

## 5.0 - AGRADECIMENTOS

Aos participantes dos grupos de trabalho: Armando Bordignon (sede), Carlos Wagner (LUBNOR), Luiz Dresher (REPAR), Paulo Ruoso (REPAR), Roberval Bulgarelli (RPBC), Willy Jock (REPLAN), Rodrigo Veras (REDUC), José Crivochein (RECAP), Arlindo Araújo (REMAN), Andrey Pereira (RLAM) e empresas WEG e ABB.

## 6.0 - CONCLUSÕES

A solução para o problema dos afundamentos de tensão nos sistemas industriais passa pelo estudo dos equipamentos individualmente e por uma visão do sistema elétrico como um todo. Estas duas partes não podem ser vistas isoladamente: há uma interação entre elas. Todos estes estudos fazem parte de um trabalho multidisciplinar com participação das engenharias elétrica, mecânica, de processamento e de controle.

A ferramenta computacional a ser usada deverá simular dinamicamente o sistema. Os programas que fazem o estudo de queda de tensão em regime permanente não são adequados para o

estudo de reaceleração. Os programas de estabilidade transitória são os mais apropriados.

A indústria deverá sempre manter contato com as universidades e centros de pesquisa buscando parcerias no aprofundamento das pesquisas e soluções na área da qualidade da energia elétrica.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std 1159-1995, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*.
- [2] M.H.J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press, 2000.
- [3] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan and H.W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 1996.
- [4] P. Pohjanheimo, M. Lehtonen, "Equipment Sensitivity to Voltage Sags – Test Results for Contactors, PCs and Gas Discharge Lamps", *10<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.
- [5] J. Pedra, F. Córcoles, L. Sainz, "Study of AC Contactors During Voltage Sags", *10<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.
- [6] M.H.J. Bollen, "The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 31, No. 4, pp. 667-674, July/August 1995.
- [7] K.W. Carrick, "Minimizing the Effects of Voltage Disturbances on Continuous Industrial Processes", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 32, No. 6, pp. 1424-1430, November/December 1996.
- [8] S.S. Mulukutla, E.M. Gulachenski, "A Critical Survey of Considerations in Maintaining Process Continuity During Voltage Dips while Protecting Motors with Reclosing and Bus-Transfer Practices", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 1299-1305, August 1992.
- [9] K.W. Carrick, R.E. Long, T.B. Smith, "Voltage Dip Protection with DC Motorstarter Coils", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-9, No. 3, pp. 358-365, May/June 1973.
- [10] A.P. Gabba, J.D. Hill, "Make Automatic Power Source Transfers a Success for your Plant", *Proceedings of the 1998 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee*, September, Indianapolis, USA, pp. 29-40.
- [11] D.L. Hornak and D.W. Zipse, "Automated Bus Transfer Control for Critical Industrial Processes", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 27, No. 5, pp. 862-871, September/October 1991.
- [12] Industrial Power Systems Data Book – General Electric, *Unusual Design Problems – Load Reclosing and Transfer*, December 1962.
- [13] G.S. Grewal, S. Pocsai, M.M. Hakim, "Transient Motor Reacceleration Study in an Integrated Petrochemical Facility", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 35, No. 4, pp. 968-977, July-August 1999.