



SCQ/007
21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

STE

INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES MOMENTÂNEAS DE TENSÃO NA OPERAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Nelson C. de Jesus*, João A.M. Neto
Raul F. Sales, Armando L. Ortiz
UNIJUÍ

João R. Cogo
GSI - Engenharia e Consultoria

RESUMO

Este informe técnico apresenta os resultados de simulações de inversores de frequência PWM no Programa de Transitórios Eletromagnéticos MICROTRAN. As influências de variações de tensão balanceadas e desbalanceadas causadas por faltas no sistema elétrico também serão avaliadas. O comportamento do sistema antes, durante e após os distúrbios pode ser verificado, servindo como base para comparações em aplicações práticas, bem como no suporte a análise de estudos relacionados a qualidade de energia. Para mitigar os efeitos de subtensões de curta duração foram simulados casos de transferência de carga para um alimentador alternativo utilizando chaves estáticas de manobra.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem. Inversores PWM. Qualidade de Energia. Subtensões de Curta Duração. MICROTRAN.

1.0 - INTRODUÇÃO

Diversos tipos de distúrbios no sistema elétrico podem provocar a operação inadequada de equipamentos sensíveis, ocasionando problemas na qualidade de energia em função de alterações no controle de equipamentos eletrônicos, o que implica em enormes prejuízos principalmente aos consumidores industriais.

Os equipamentos utilizados para automação e melhoria dos modernos processos industriais apresentam margens estreitas em relação a suportabilidade sob variações de tensão de curta duração, as quais podem causar grande impacto em Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD), Controladores Lógicos Programáveis (CLP), Acionamentos Elétricos Controlados, entre outros.

Em particular, as indústrias utilizam inversores de frequência em grande escala, sendo que os mesmos possuem sistemas de controle altamente sensíveis a perturbações, principalmente aquelas oriundas do sistema elétrico, provocando interrupções de processos industriais e conseqüente necessidade de nova partida da planta.

Os distúrbios podem originar-se tanto no sistema do consumidor quanto no sistema de energia elétrica (1). Interrupções e subtensões de curta duração são responsáveis pelos maiores impactos econômicos sobre consumidores industriais e comerciais (2). As conseqüências na operação de equipamentos sensíveis dependem, basicamente, da intensidade e duração dos distúrbios, bem como dos limites adotados pelos fabricantes. Nesse sentido, estão sendo estabelecidas recomendações e normas visando a adequação e compatibilidade dos sistemas elétricos e equipamentos. Algumas medidas devem ser tomadas quando da ocorrência de problemas no acionamento de inversores, onde a análise das causas e conseqüências é fator preponderante na busca da melhor solução, incluindo em alguns casos o emprego de condicionadores de energia.

Inúmeros são os relatos de desligamentos involuntários de acionamentos em função de variações na tensão de suprimento. As perturbações normalmente ocorrem devido as subtensões ou sobretensões de curta duração. Em ambas as situações, a tensão do link DC é afetada, podendo atingir valores fora da faixa de operação normal. Desta forma, os parâmetros do filtro (LC) definem o grau de vulnerabilidade do inversor sob condições de variações momentâneas de tensão. O dimensionamento do capacitor do filtro no link DC contribui para aumentar a capacidade de operação do inversor, estando diretamente relacionado ao custo final do sistema de acionamento. Casos típicos de sobretensões tem sido reportados em função de

energizações de bancos de capacitores nos sistemas elétricos. Porém, os distúrbios mais comuns existentes nos sistemas elétricos são as subtensões de curta duração. As principais causas de subtensões momentâneas são as faltas no sistema elétrico e partida de grandes motores. Quando ocorre uma falta no sistema elétrico de distribuição, os dispositivos de proteção atuam, resultando em sucessivas variações durante os religamentos.

Os efeitos dos distúrbios de tensão no acionamento de motores de indução com inversores de frequência devem ser investigados, sendo que eventuais desligamentos dependem da operação da máquina frente às variações na tensão do link DC e conseqüente tensão alternada de saída AC, dos níveis de sobretensão dimensionados para os semicondutores de potência, da sensibilidade e capacidade da eletrônica utilizada no controle dos inversores, além dos limites e ajustes dos sistemas de proteção. A análise da qualidade de energia torna-se importante para prever a influência de tais fenômenos na operação dos equipamentos, sendo necessária tanto na fase de projeto como também sob condições de operação.

Durante a realização das simulações e respectivas análises, utilizou-se o Programa de Transitórios Eletromagnéticos MICROTRAN (6), (5). Os resultados envolvendo a operação de motores de indução trifásicos acionados por inversores de frequência PWM são apresentados durante a ocorrência das perturbações. Sendo assim, pode-se avaliar o desempenho de inversores de frequência sob as mais diversas variações na qualidade de energia.

2.0 - MODELAGEM DE INVERSORES PWM NO PROGRAMA MICROTRAN

A modelagem de inversores de frequência do tipo fonte de tensão com modulação por largura de pulsos (PWM) foi elaborada através da subrotina de controle ALPHA, obtendo-se modos de comando para disparo e bloqueio dos semicondutores de potência que formam o inversor.

O circuito adotado como base para realização das simulações dinâmicas é mostrado na Figura 1. O sistema de controle do inversor foi baseado na técnica de modulação PWM senoidal, utilizando uma onda triangular como portadora em comparação a uma senoidal de referência, sendo que as intersecções determinam os instantes de disparo e comutação dos transistores (IGBT's) ou GTO's. Neste caso, considerou-se uma fonte trifásica de corrente alternada na alimentação da ponte a diodos com um filtro LC no link DC, o qual mantém a tensão constante na entrada do inversor. Através da variação proporcional da magnitude da tensão de referência com relação a frequência requerida, pode-se obter a característica adequada aos acionamentos de motores de indução em quase toda a faixa de operação, nas condições de conjugado constante (4).

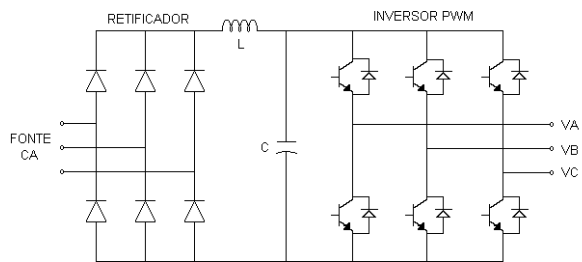


FIGURA 1 - Circuito básico do inversor PWM

Inicialmente, realizou-se simulações com cargas do tipo RL para verificação dos resultados e eventuais adaptações na rotina e/ou variáveis de controle. Durante as simulações, considerou-se os dispositivos utilizados no retificador trifásico a diodos e inversor de frequência como sendo ideais. Os resultados apresentados nas Figuras 2 e 3, foram obtidos adotando-se uma tensão da fonte de 380 V, frequência de 60 Hz, filtro capacitivo de 0.3 F e uma carga com $R = 20 \Omega$ e $L = 100 \text{ mH}$, conectada em delta. A Figura 2 apresenta a onda senoidal de referência da fase A, superposta a onda triangular portadora, a qual possui uma frequência de 21 vezes a de referência. Para estas condições, variou-se proporcionalmente a amplitude e frequência da senóide de referência, passando de 60 Hz para 40 Hz durante o primeiro segundo da simulação. A Figura 3 mostra as correntes resultantes da variação de frequência da tensão aplicada a carga.

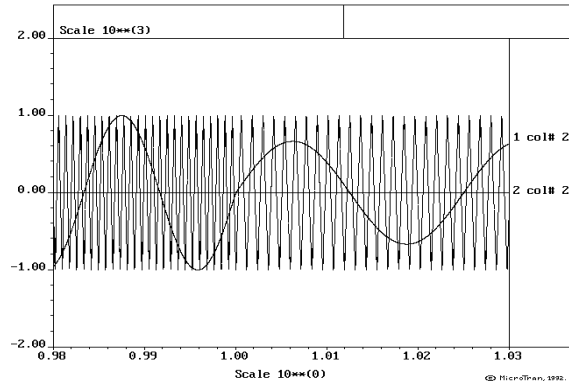


FIGURA 2 - Sinais de referência no controle do inversor PWM

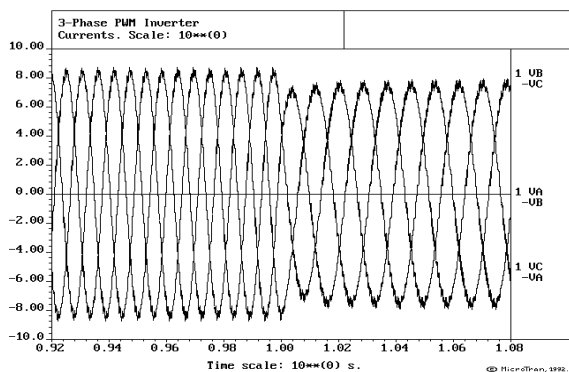


FIGURA 3 - Corrente de saída do inversor PWM com carga RL

3.0 - SISTEMA ADOTADO PARA ANÁLISE.

Para avaliar os efeitos de variações de tensão no desempenho de acionamentos com velocidade variável, adotou-se o sistema mostrado na Figura 4. O inversor é alimentado através da tensão secundária de 380 V do sistema de distribuição em 13,8 kV. O sistema de distribuição totaliza 10 km de extensão com cabo 4/0 CAA, sendo suprido através do sistema de transmissão em 138 kV, o qual apresenta uma potência de curto circuito de 2000 MVA. O transformador da subestação está conectado em delta/estrela-aterrada e possui potência nominal de 25 MVA. O transformador responsável pela alimentação do sistema inversor apresenta a mesma conexão do transformador principal. As faltas consideradas na análise foram simuladas no final do sistema de transmissão e ponto de acoplamento comum ao transformador da subestação, implicando em tensões fase-terra próximas a 80% da nominal. Foram verificados casos com curtos circuitos monofásicos e trifásicos à terra, implicando em subtensões balanceadas e desbalanceadas na entrada do inversor PWM. Utilizando o sistema retificador-inversor da Figura 1 e mesmas características de chaveamento, realizou-se a análise com um motor de indução trifásico de 200 CV, 4 pólos, 380 V, conectado em estrela-aterrada e sob carregamento próximo ao nominal. O sistema de acionamento é transferido para o alimentador alternativo durante o início dos distúrbios através de chaves estáticas.

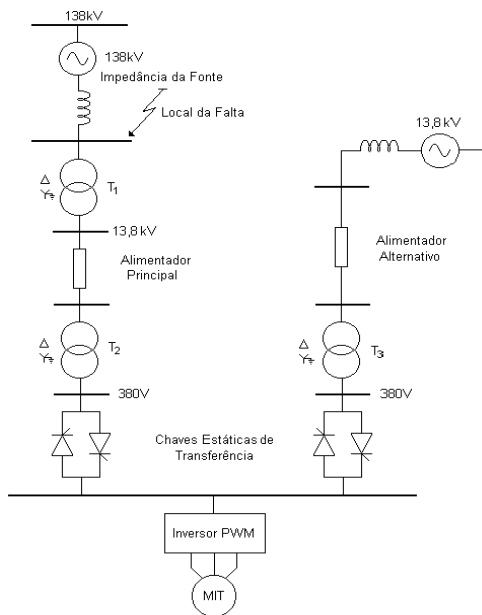


FIGURA 4 - Diagrama unifilar do sistema em análise

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

A seguir, apresenta-se os resultados obtidos durante as simulações dinâmicas, onde verifica-se o comportamento do inversor PWM para tensões balanceadas e desbalanceadas. Durante a análise das simulações, adotou-se a operação do motor sob duas

velocidades, respectivamente em função da variação da frequência de 60 Hz para 40 Hz. A partida foi adotada como direta (tensão nominal) em virtude do tempo total de simulação envolvido. As faltas monofásicas e trifásicas foram inseridas para os instantes de 2 e 4 seg. de simulação, valores equivalentes a operação com frequências respectivas de 60 Hz e 40 Hz. Comparando-se os resultados para as frequências citadas, observa-se o mesmo comportamento típico, exceto que, a 40 Hz, as variações nas tensões e correntes do sistema são de magnitude inferior. Por este motivo, os resultados apresentados referem-se somente a operação com frequência de 60 Hz. Verificou-se, porém, que na operação com velocidade inferior ocorre um intervalo maior de descontinuidade na corrente de entrada da ponte retificadora a diodos. A Figura 5 ilustra a velocidade do motor sob condições normais de operação. De qualquer modo, a mesma não sofre variações significativas durante os distúrbios pelo intervalo de tempo equivalente da falta (100 ms), além dos parâmetros adotados para as constantes do motor.

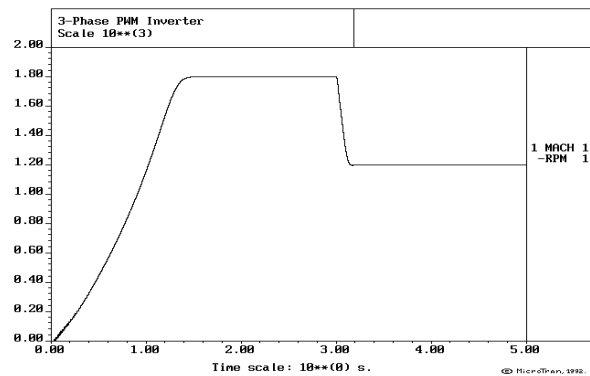


FIGURA 5 - Velocidade desenvolvida pelo MIT

4.1 - Subtensões Trifásicas

As respostas para uma falta trifásica no sistema de transmissão durante um intervalo de 100 ms são apresentadas, sendo que resultaram em subtensões fase-terra próximas a 80% da nominal no lado de 13,8 kV (Figura 6). Os efeitos para as condições descritas anteriormente são discutidos a partir dos resultados e formas de onda das tensões e correntes do sistema.

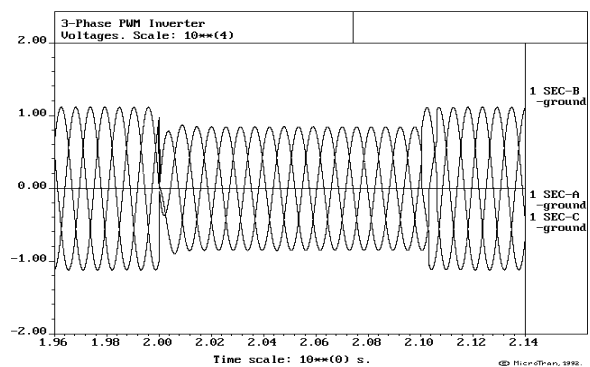


FIGURA 6 - Tensões no sistema de distribuição durante falta trifásica

A tensão de saída do inversor é mostrada na Figura 7, sendo significativamente afetada durante o afundamento da tensão no sistema e link DC.

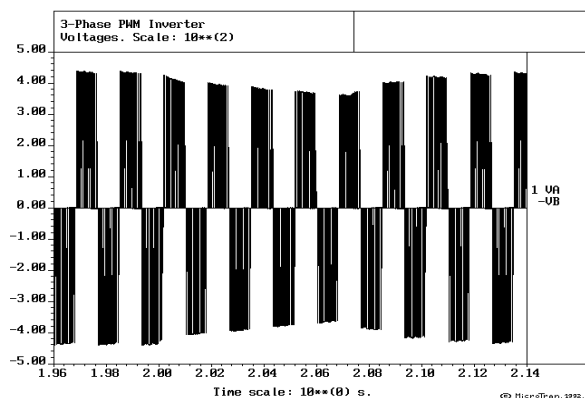


FIGURA 7 - Tensão de saída do inversor durante falta trifásica

As correntes de alimentação do sistema inversor apresentaram um pequeno período de descontinuidade, em função do bloqueio dos diodos devido a variação de tensão do capacitor. A Figura 8 ilustra a corrente de entrada do inversor para a fase A, sendo as fases restantes bem similares. A corrente da fase A no lado de 13,8 kV do transformador que alimenta o acionamento é ilustrada na Figura 9.

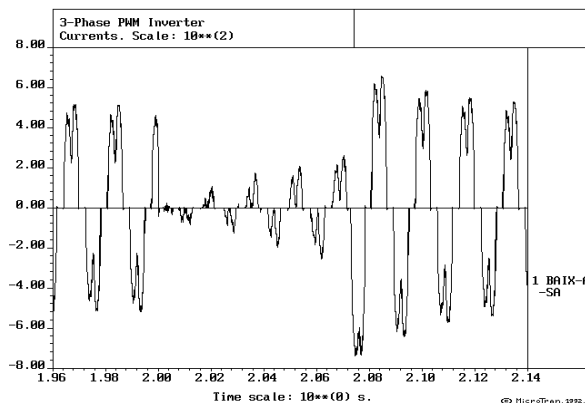


FIGURA 8 - Corrente de entrada do inversor (fase A)

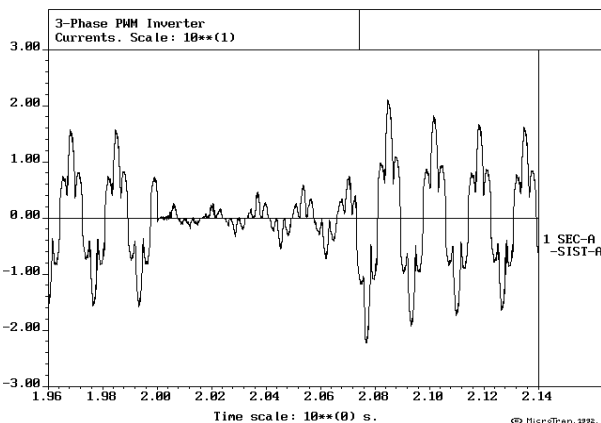


FIGURA 9 - Corrente primária do transformador do inversor durante falta trifásica (fase A)

4.2 - Subtensões Monofásicas

Apresentam-se os resultados das simulações para uma falta do tipo fase-terra ocorrida no sistema de transmissão, gerando tensões desbalanceadas na alimentação do inversor. A Figura 10 mostra as tensões fase-terra no sistema de distribuição, enquanto as tensões de linha são influenciadas pela conexão D/Y (138/13,8 kV) do transformador da subestação. Desta forma, uma falta fase-terra no primário afeta as três tensões de linha no lado secundário. Deve-se salientar que os efeitos das subtensões nas características de operação dos inversores dependerão também do tipo de conexão utilizada.

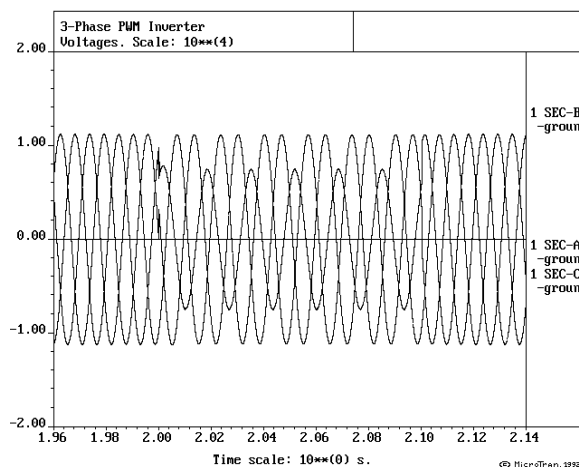


FIGURA 10 - Tensões no sistema de distribuição durante falta monofásica

Simulou-se a operação do inversor PWM sob tensões desbalanceadas de alimentação em função da falta monofásica. A tensão aplicada ao motor sofre uma pequena redução em sua amplitude, bastante inferior a de uma falta trifásica, portanto, sem maiores consequências na operação do motor. A Figura 11 apresenta a tensão de saída do inversor durante o intervalo da falta.

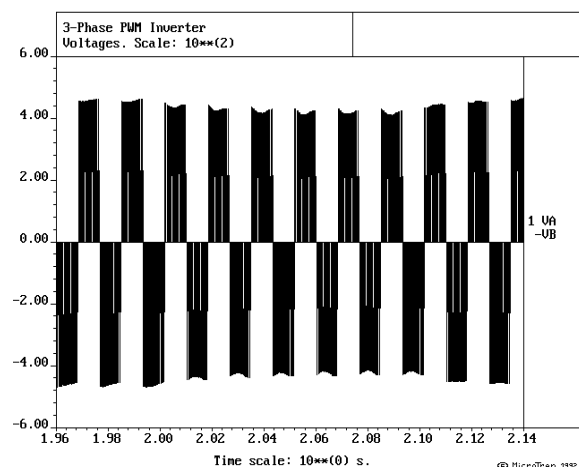


FIGURA 11 - Tensão de saída do inversor durante falta monofásica

Apesar do menor impacto na tensão DC para este caso, se comparado a falta trifásica, as tensões desbalanceadas afetam significativamente as correntes do sistema, que apresentam comportamentos distintos, com elevada distorção na forma de onda. Dependendo do grau de desbalanço e características do sistema, tem-se a ocorrência de falhas na comutação dos diodos utilizados na ponte retificadora.

As Figuras 12, 13 e 14 ilustram as correntes das três fases no lado de 13,8 kV do transformador (alimentador principal) que supre o inversor PWM. A corrente da fase A apresenta um comportamento particular, sendo que as fases B e C apresentam características semelhantes, com valores superiores a fase A durante a perturbação. Além disso, comprova-se através das simulações que a tensão BC no lado de 13,8 kV sofre um pequeno aumento durante o distúrbio. Após a eliminação da falta, as correntes voltam a apresentar um comportamento normal com características típicas de conversores de seis pulsos.

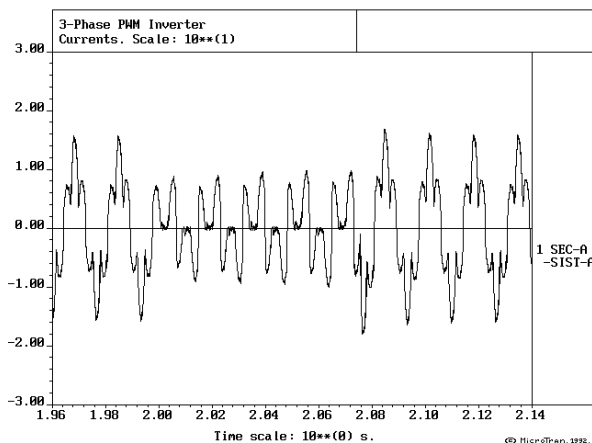


FIGURA 12 - Corrente primária do transformador do inversor durante falta monofásica (fase A)

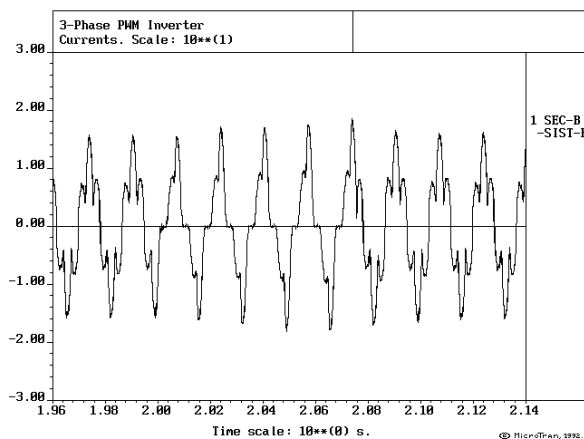


FIGURA 13 - Corrente primária do transformador do inversor durante falta monofásica (fase B)

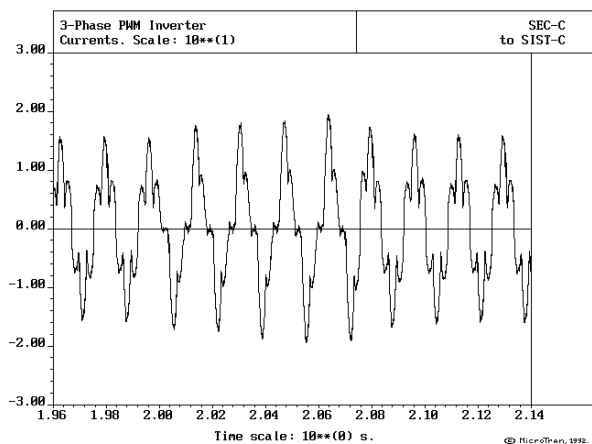


FIGURA 14 - Corrente primária do transformador do inversor durante falta monofásica (fase C)

4.3 - Transferência de Carga com Chave Estática

A alternativa da utilização de chaves estáticas com o objetivo de mitigar problemas de qualidade de energia vem cada vez mais sendo empregada nos diversos níveis de tensão. Sendo assim, torna-se interessante analisar esta operação junto aos inversores de frequência devido ao número considerável de aplicações. Sistemas que utilizam a transferência de carga através de chaves estáticas de manobra (tiristores/GTO's), apresentam um tempo de resposta próximo a 4 ms, fornecendo condições para manter os equipamentos sensíveis em operação. Na simulação desta manobra, considerou-se que os pares de tiristores trabalham de modo complementar, portanto, simultaneamente na condição de abertura do alimentador principal e conexão ao alimentador alternativo. Adotou-se que ambos os sistemas estavam sincronizados durante esta manobra. A análise desta configuração também foi realizada para as condições descritas anteriormente, ou seja, tanto para faltas monofásicas e trifásicas, quanto para operação sob frequências de 60 Hz e 40 Hz. Os resultados foram satisfatórios e estabelecem como uma alternativa ao condicionamento, obviamente baseada na relação custo-benefício do investimento, para prover os sistemas e equipamentos com cargas sensíveis na presença de variações momentâneas da tensão. Em determinadas simulações, observou-se transitórios de relativa intensidade no instante da transferência de alimentador, porém, permanecendo somente por um pequeno intervalo. As Figuras 15 e 16 mostram, respectivamente, as correntes de entrada do inversor na fase A, durante a operação do sistema principal, e, logo após, na transferência para o sistema alternativo em 13,8 kV, objetivando reduzir o impacto de subtensões de tensão na operação de equipamentos sensíveis, como os acionamentos de motores de indução controlados por inversores de frequência PWM. Outras alternativas podem ser avaliadas através das simulações com programas de transitórios eletromagnéticos, fornecendo resultados que auxiliam a tomada de decisões e análise dos efeitos de novos equipamentos nos sistemas elétricos.

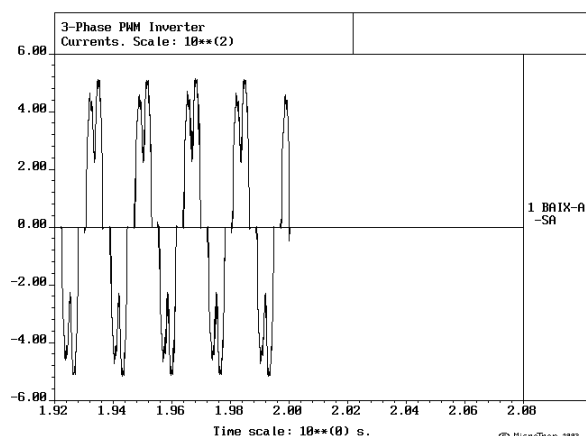


FIGURA 15 - Corrente de entrada do inversor na configuração original (fase A)

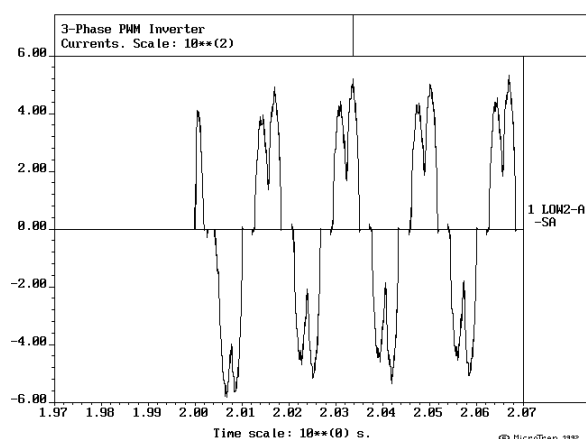


FIGURA 16 - Corrente de entrada do inversor na transferência para um alimentador alternativo (fase A)

5.0 - CONCLUSÕES

Este informe técnico apresentou os resultados de simulações com um sistema típico de distribuição, o qual alimentava um acionamento controlado para o motor de indução trifásico através de inversores de frequência PWM. O modelo do inversor foi implementado junto a subrotina de controle ALPHA no Programa de Transitórios Eletromagnéticos MICROTRAN. Foram simulados casos com faltas trifásicas e monofásicas no sistema adotado, o que implicou em subtensões balanceadas e desbalanceadas na alimentação do inversor. Avaliou-se o comportamento para duas velocidades do motor, sendo que as conseqüências na operação, dependem, das características do sistema, severidade das variações, duração e número de fases afetadas. Na prática, os sistemas de controle e proteção dos acionamentos serão determinantes nos eventuais desligamentos do inversor, e, sobretudo, como a tensão no link DC se comporta a essas variações. De qualquer modo, verificou-se que subtensões balanceadas em função de faltas trifásicas são mais severas do que as faltas monofásicas, afetando

significativamente a tensão de saída do inversor. Um outro aspecto a destacar é que a velocidade desenvolvida não sofreu variações consideráveis durante as perturbações, em função do intervalo equivalente e constantes mecânicas do motor, neste caso, estas considerações foram válidas tanto para simulações com 60 Hz como para 40 Hz. Em relação a falta fase-terra simulada durante a análise, observou-se que não é significativa quanto a deterioração da tensão no link DC, mas implica em correntes distorcidas durante o momento das subtensões, afetando as características de entrada principalmente em relação a respectiva fase da falta. Os efeitos dos fenômenos que afetam a qualidade de energia e conseqüente operação de inversores de frequência PWM, podem ser avaliados através de simulações dinâmicas, verificando o comportamento das grandezas antes, durante e após os distúrbios. Na simulação de transferência do inversor para uma fonte alternativa durante a ocorrência das subtensões, os resultados foram satisfatórios, mostrando a eficiência de chaves estáticas para mitigar problemas de qualidade de energia devido ao baixo tempo de resposta.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) McGranaghan, M.F., Mueller, D.R., Samotyj, M.J. Voltage Sags in Industrial System; IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 29, nº 2, March/April 1993.
- (2) Lamoree, J. et al. Voltage Sags Analysis Case Studies; IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, July/August 1994.
- (3) Tang, L. et al. Distribution System Voltage Sags: Interaction with Motor and Drive Loads; Electrotek Concepts.
- (4) Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P. Power Electronics, Converters, Applications and Design; Wiley, New York, 1995.
- (5) Oliveira, H.R.P.M., Cogo, J.R. Modelling of a Control System of Static Var Compensator Type Thyristors Controlled Reactors with Fixed Capacitors for Simulation in the Microtran; Proceedings of the 1997 International Conference on Power Systems Transients, June 22-26, Seattle.
- (6) Microtran Power System Analysis Corporation. Transients Analysis Program Reference Manual; Vancouver, Canadá, 1991.
- (7) Dommel, H.W. EMTP Theory Book; Vancouver, Canadá, 1992.