

QUANDO AS “COISAS” PARTEM

*Por Eng. Jose Starosta; MSc.
Diretor da Ação Engenharia e Instalações*

As partidas das máquinas elétricas (motores e transformadores), energização de capacitores, alguns circuitos especiais e mesmo as lâmpadas de vapores metálicos ou de sódio possuem comportamento durante a partida ou energização que podem afetar outras partes das instalações elétricas ou mesmo os próprios equipamentos. As causas e efeitos são as mais diversas e trataremos de algumas situações na sequência.

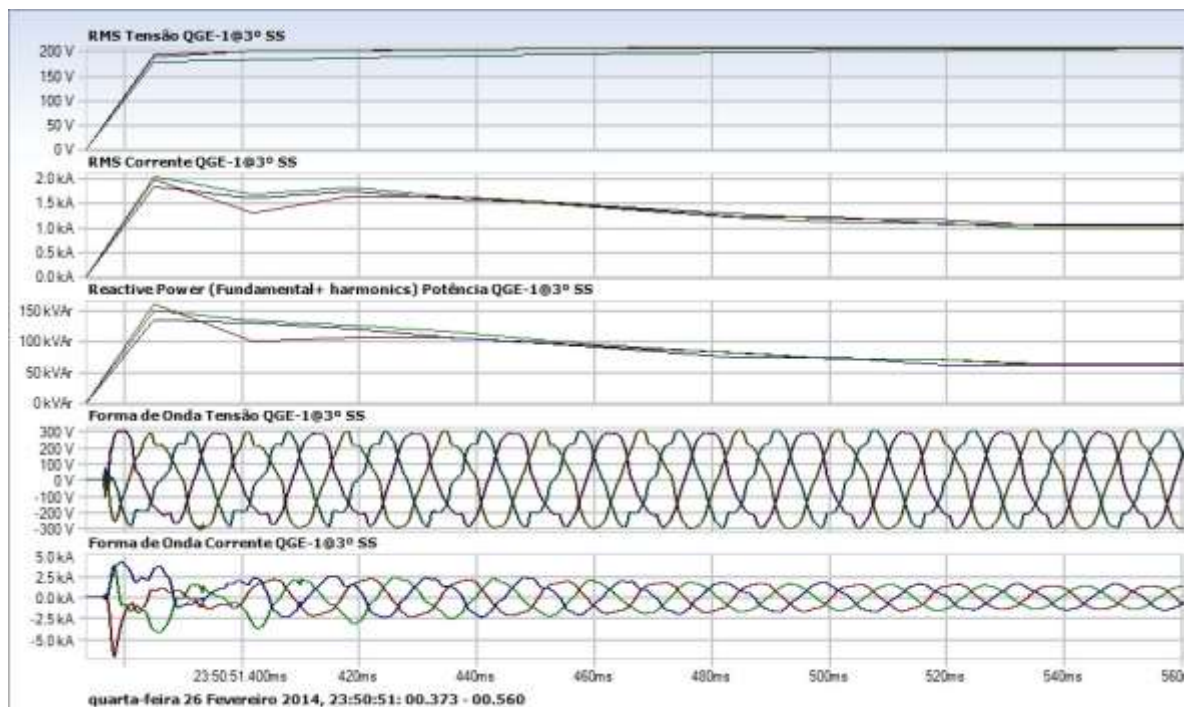
PARTE 1-TRANSFORMADORES

Correntes de partida em transformadores são conhecidas e reconhecidas como uma das principais fontes de afundamentos de tensão em circuitos e barramentos a montante; em sistemas de distribuição típicos de concessionárias ou mesmo instalações industriais; a situação se agrava quando diversos transformadores tentam partir simultaneamente e circuitos longos associados agravam o problema.

Os valores clássicos das correntes de partida (também chamadas de acordo com a terminologia internacional de “*In rush*”) podem atingir valores da ordem de 20 vezes a corrente nominal e em sistemas com baixas potências de curto-circuito a situação pode ser também piorada. Considerando-se ainda a impossibilidade de sincronismo com manobra mecânica, os valores de corrente são os mais improváveis possíveis, uma vez que dependem do instante (associado à forma de onda de tensão) onde a conexão se estabelece. Ainda, a própria corrente não é equilibrada, uma vez que depende da energização do circuito magnético do transformador que tem pela própria construção característica desequilibrada.

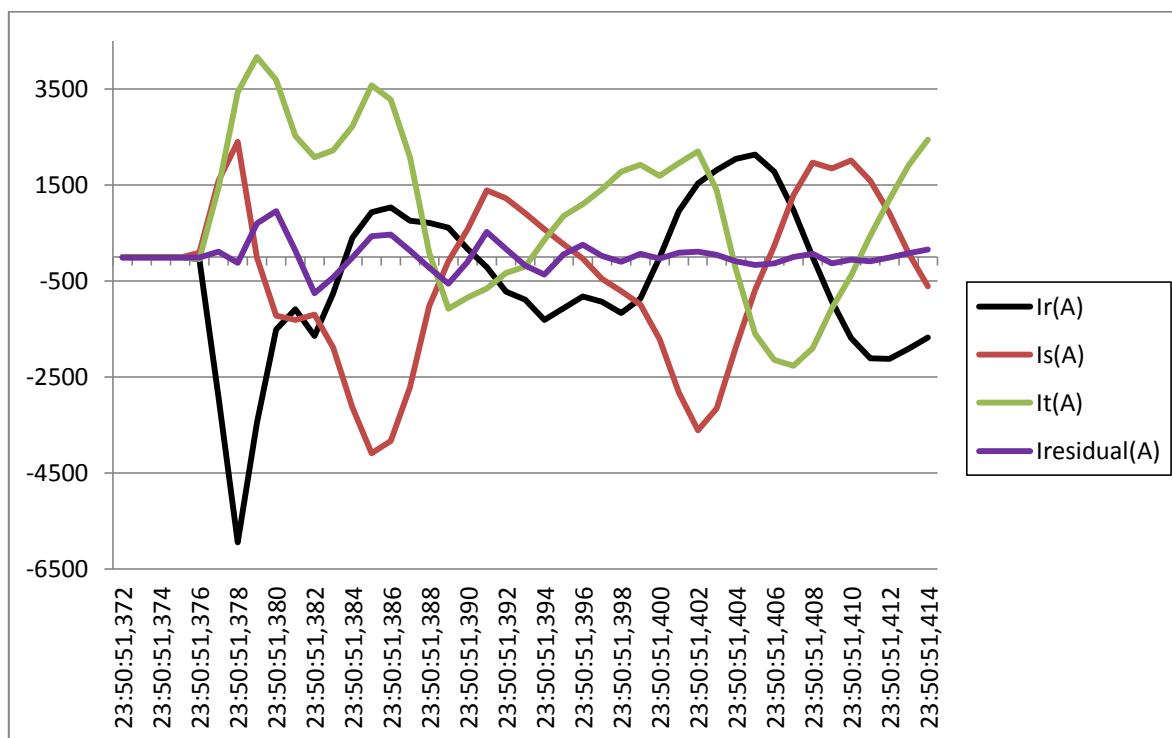
A figura 1.1, ilustra o comportamento das correntes e tensões eficazes e formas de ondas registradas na partida de um transformador de 2000 kVA em 13,2kV para 220V. Chama a atenção o desequilíbrio das correntes e efeitos na tensão como a ocorrência de transientes.

Figura 1.1 – comportamento das correntes e tensões rms e comportamento das formas de onda de tensão e corrente.



Tomando-se as 1024 amostras por ciclo da forma de onda de corrente fornecida pelo instrumento, pode-se efetuar uma análise mais detalhada do fenômeno, representado na figura 1.2. Além dos altos valores esperados, observa-se o comportamento da soma das correntes das fases que é representada pela corrente de neutro ou de terra dependendo do caso (I_n) e tem efetiva aplicação do modelo de proteção de fuga à terra que se deseja empregar; naturalmente a corrente é transitória e tão logo o transformador é energizado esta corrente desaparece.

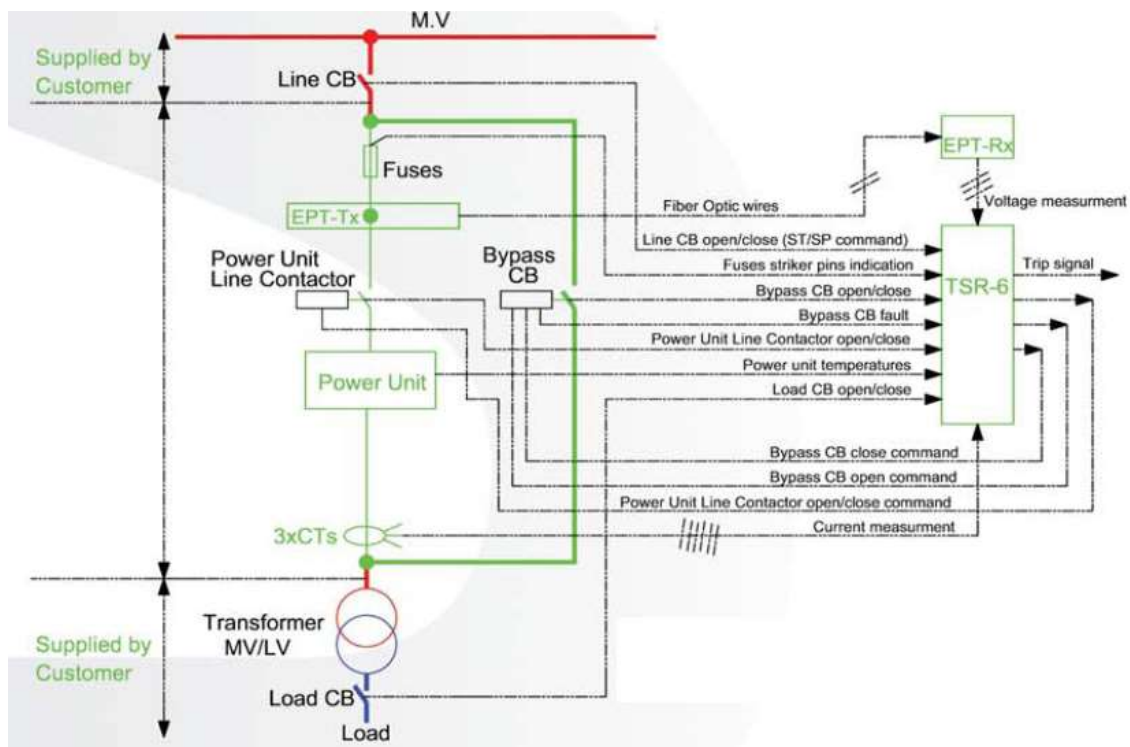
Figura 1.2 – forma de onda das correntes de partida de transformador 2000 kVA.



SOLUÇÃO:

Uma das possíveis soluções são os pouco conhecidos dispositivos de partida suave para transformadores, que a exemplo dos seus “irmãos” aplicados em grande volume na partida nos motores elétricos, utilizam componentes e elementos estáticos para o controle da tensão de alimentação e como consequência a corrente de partida. O sistema possui uma unidade de controle e outra de potencia; toda a operação é realizada com o Trafo sem carga; no instante em que o Trafo é energizado um contator de “by pass” assume a carga propriamente dita em sincronismo com o sistema de partida suave, após partida do transformador. No instante em que a operação é realizada, a unidade de controle manda um sinal para que a carga seja conectada. A figura 3 ilustra o dispositivo.

Figura 1.3 – esquema do dispositivo de partida suave de transformador

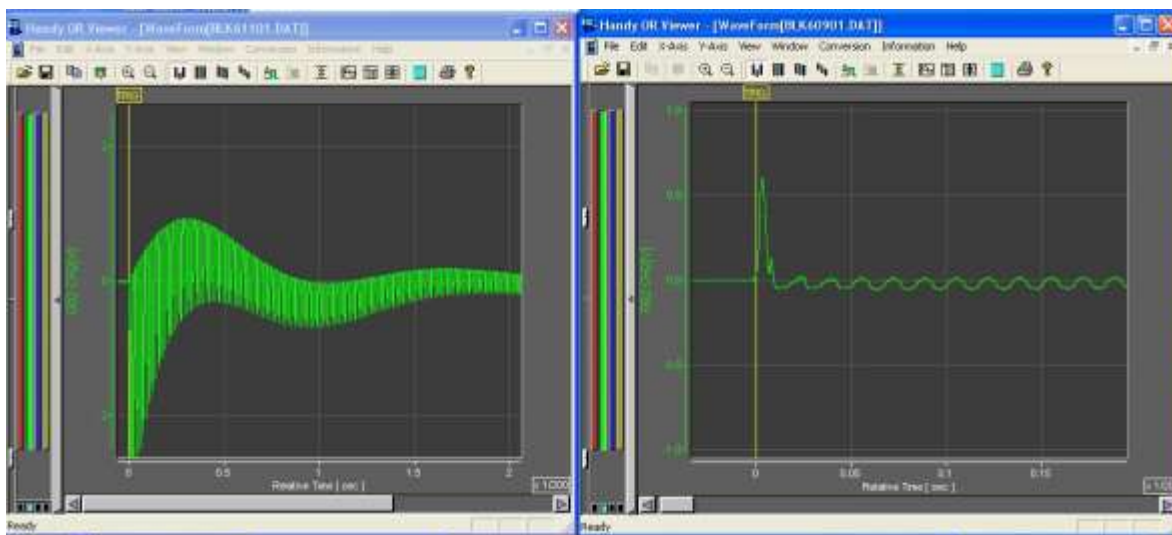


Registros de operação

As figuras 1.4 e 1.5 ilustram outros registros da corrente de In-rush de transformadores.

FIGURA 1.4 –PARTIDA DE TRAFÓ SEM CONTROLE

FIGURA 1.5 – PARTIDA DE TRAFÓ COM CONTROLE



Na figura 1.4 observa-se a corrente de partida da ordem de 3 vezes a corrente nominal; já a figura 5 apresenta o mesmo caso com dispositivo partida suave; observa-se corrente máxima da ordem de 60% da corrente nominal com tempo de partida da ordem de 1 ciclo.

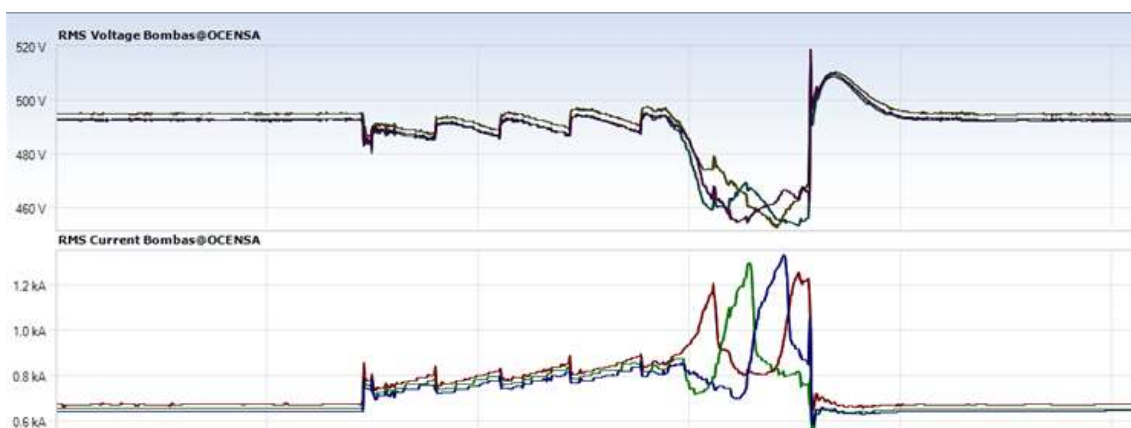
PARTE 2 -PARTIDAS DE MOTORES

As correntes de partida em motores de corrente alternada são uma das mais “combatidas” no cotidiano das grandes instalações e historicamente a tecnologia tem auxiliado no tratamento deste assunto, a razão principal é a importância direta destas correntes na qualidade da energia e afundamentos de tensão relativos. O principal ponto de consideração no tema é a limitação desta corrente de partida dos motores de forma que a rede elétrica não “sofra” e suporte a solicitação da partida em todo seu regime até que se atinja o regime síncrono (operação estável) com a minimização dos afundamentos e transientes decorrentes destas partidas. Por outro lado enquanto determinada carga tenta partir outras se encontram em operação na mesma rede, e a partida desta carga não pode interferir na operação plena das outras.

Várias foram as soluções encontradas em corrente alternada para este fim em função da tecnologia disponível. Inicialmente os dispositivos eletromecânicos como chaves compensadoras, autotransformadores, chaves estrelas triangulo e outros dispositivos que por reduzirem a tensão na alimentação inicial, reduzia também as correntes de partida em valores consideráveis proporcionando menor impacto na qualidade da tensão não só da carga que tentava partir, mas na operação normal de outras que já operavam no mesmo barramento, conforme acima já exposto.

A fonte de alimentação sempre teve uma participação importante no processo da partida, na medida em que a potencia de curto circuito no barramento onde o motor esta conectado apresenta alta (satisfatória) capacidade, menor serão os problemas e consequências das partidas dos motores. De uma forma geral a relação entre a potência da fonte e potencia do motor que se deseja partir é um primeiro indicativo do regime e da qualidade da partida esperada. Caso clássico são os motores que operam alimentados por duas fontes (rede e gerador) e que possuem bom comportamento quando operando pela rede (transformador) e pioram o desempenho quando partindo pelo gerador que normalmente possui potencia de curto circuito menor. A figura 1 apresenta a partida direta de um motor e seu efeito na rede.

FIGURA 2.1 – PARTIDA DIRETA DE MOTOR – EFEITOS DA CORRENTE NA TENSÃO.

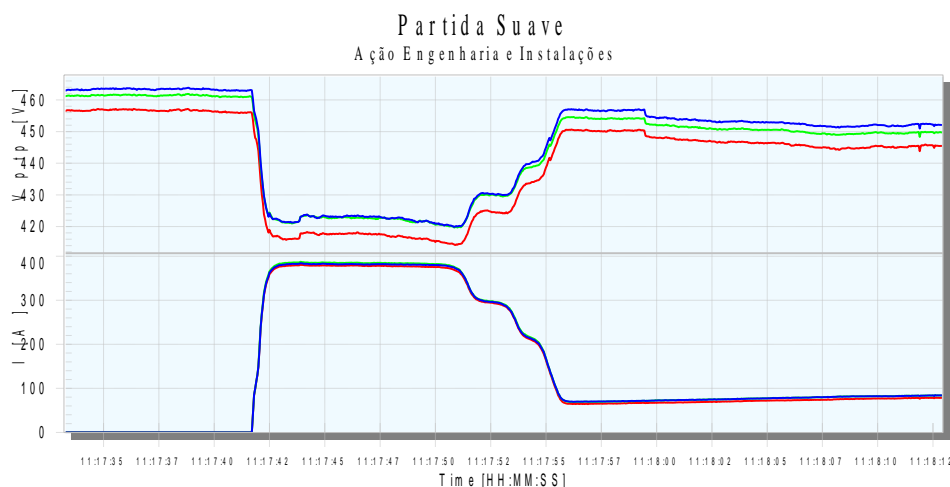


O que se observa na figura 2.1 é o incremento da corrente de partida em mais de dez vezes, além de desequilíbrio da corrente de partida, como consequência nota-se o afundamento de tensão de quase 10% impedindo que a carga seja energizada e a partida abortada.

Durante as últimas décadas foram desenvolvidos os dispositivos eletrônicos de partida que substituíram parcela importante dos dispositivos eletromecânicos citados que se encontravam (e ainda estão) instalados e principalmente equiparam as novas instalações e sistemas com a principal vantagem de estarem integrados a eficientes sistemas de automação.

Os então “novos equipamentos”, conhecidos no mercado como dispositivos de partida suave ou “soft-start” evoluíram desde sua concepção e de uma forma geral controlam a alimentação do motor durante os ciclos de partida de forma que o incremento da corrente a cada ciclo (ou combinação) permita uma partida sem impactos na rede em que o motor esta conectado. Outras variáveis devem ser consideradas neste controle, como o torque necessário para a partida o que impossibilita na maior parte dos casos uma partida totalmente linear. Estes equipamentos possuem os ajustes necessários para a maximização da performance em função das variáveis envolvidas. A figura 2.2 apresenta a partida de outro motor acionado por “soft-starter”.

FIGURA 2.2 – CORRENTE COM CONTROLE POR SOFT STARTER E CONSEQUÊNCIA NA TENSÃO DURANTE A PARTIDA



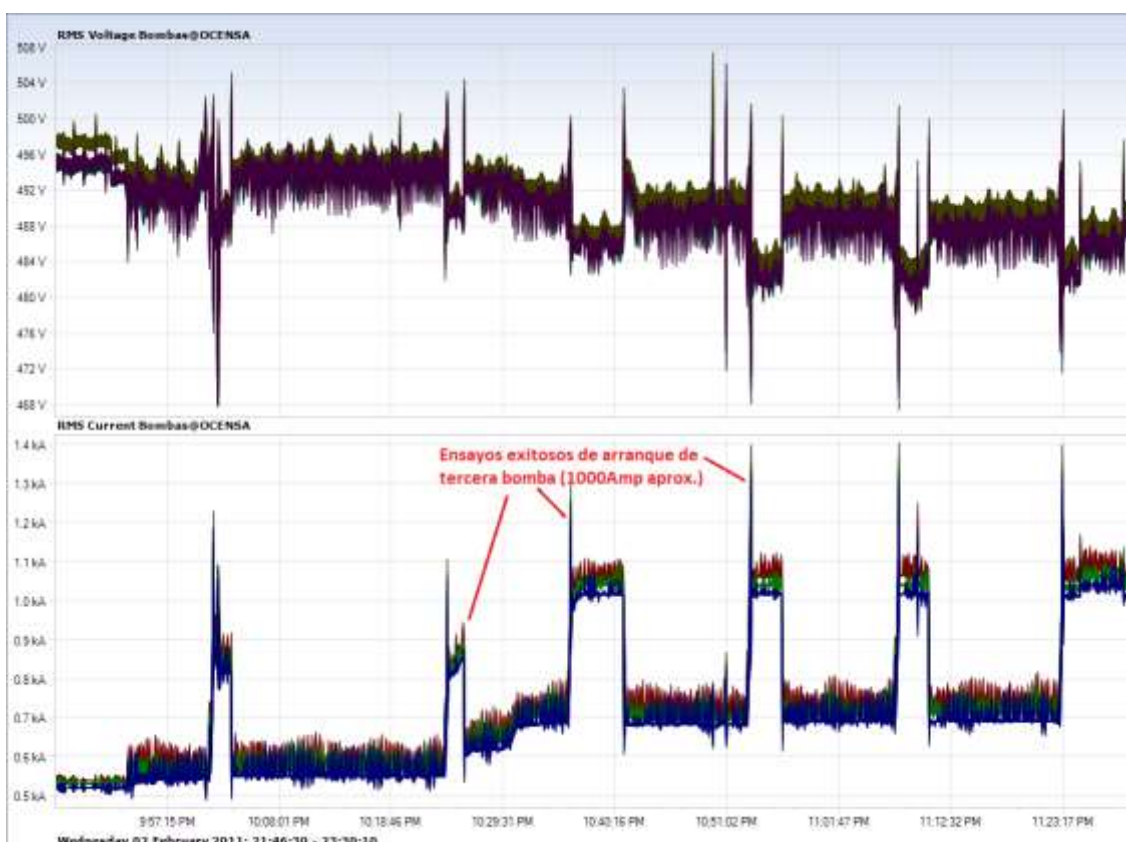
O que se pode considerar uma evolução dos “soft-starters” são os inversores de frequência, cujo principal objetivo não é exatamente efetuar a partida dos motores, mas sim controlar a velocidade dos mesmos em regime de operação normal. A variação de velocidade por meio da variação digital da frequência, além de ser uma excepcional ferramenta de ganhos com eficiência energética e automação dos processos, pode também operar como eficientes “partidores” de motores, com resultados superiores aos dos “soft-starters” em função do maior número de recursos que o primeiro.

Apesar de todo o controle, pode-se observar na figura 2 que devido a necessidade do torque de partida não se consegue linearizar a corrente de partida, o afundamento verificado na tensão de alimentação é apenas minimizado e não totalmente eliminado. No caso da figura 2, a corrente de partida é da ordem de 4 a 5 vezes a corrente nominal, causando um afundamento de 8%.

Outra possibilidade para minimização das correntes de partida é a injeção de potência reativa durante os primeiros ciclos de partida reduzindo drasticamente a corrente de partida (que tem grande parcela de energia reativa) permitindo a manutenção da tensão da rede em níveis adequados. Esta discussão (Compensação de afundamentos de

tensão na partida de motores com uso de compensadores estáticos), foi o tema da edição de Julho de 2011 e o gráfico da figura 3 ilustra a situação da partida de grupo de motores com compensação reativa adequada durante a partida. Esta situação pode ainda ser encontrada em cargas localizadas distantes das fontes por questões operacionais, é o caso de plataformas de petróleo, com fontes de baixa potencia de curto (geradores) e bombas localizadas em distancias consideráveis.

FIGURA 2.3 – PARTIDA BEM SUCEDIDA COM COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA ESTATICA NA PARTIDA



São varias as soluções, e a especificação das mesmas deve considerar o estudo de todas as variáveis elétricas e operacionais envolvidas e não somente os custos aparentes destas possíveis soluções.

PARTE 3- PARTIDAS DE CAPACITORES

A injeção de energia reativa em instalações elétricas de baixa tensão com a instalação de capacitores já foi apresentada e discutida em colunas anteriores de "O setor elétrico" com diversas abordagens incluindo além dos aspectos de compensação do fator de potência em si, ressonância harmônica, velocidade de manobra, influencia em operação com geradores e outras características (ver edições de Janeiro de 2014, maio e junho de 2011, Setembro de 2012 e outras).

Outro ponto que merece ser tratado são os aspectos relacionados às partidas e manobras dos capacitores. Este assunto tem sido reportado em diversas oportunidades tanto nas instalações elétricas de indústrias e prédios comerciais como mesmo em circuitos de distribuição de concessionárias em média tensão e configura-se como um dos principais problemas de qualidade de energia discutidos. As figuras 3.1 A (comportamento da forma de onda de corrente) e 3.1 B (reflexo na forma de onda de tensão) extraídas de publicação do IEEE apresentam exemplo de um transiente oscilatório causado pela partida de capacitor em situação "back to back".

figura 3.1 A – transiente oscilatório de corrente causado por manobra convencional de capacitor

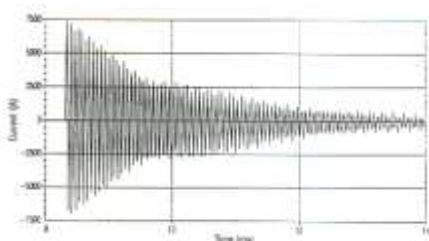


Figure 3—Oscillatory transient caused by back-to-back capacitor switching

Fonte: IEEE

figura 3.1 B – transiente oscilatório de tensão causado por manobra convencional de capacitor

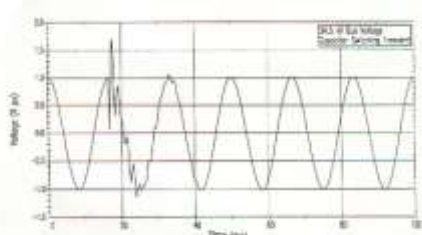


Figure 3—Low frequency oscillatory transient caused by capacitor-bank energization

Fonte: IEEE

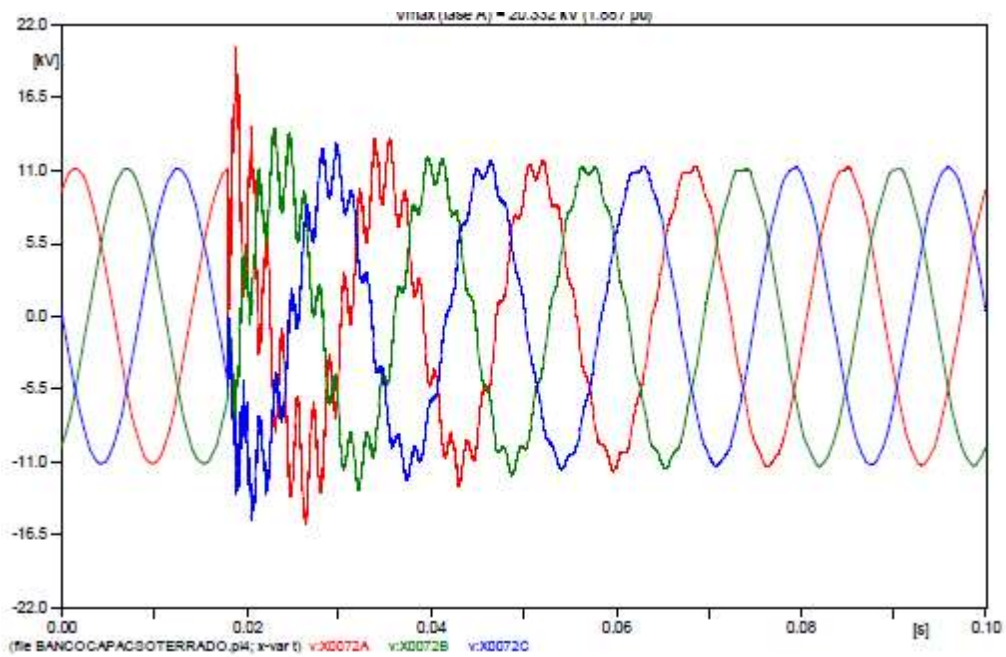
Os transientes podem atingir tensões instantâneas de até duas vezes a tensão nominal, em função do ângulo que ocorre a manobra. Devido aos componentes resistivos dos circuitos os valores típicos de sobre tensão de manobra são da ordem de 1,1 a 1,6 vezes a tensão nominal. Alguns cuidados devem ser tomados quando se utilizam manobras mecânicas de contatores:

- As cargas conectadas aos mesmos barramentos de alimentação dos bancos de capacitores (acionamentos dos motores e outras) estarão sujeitas a estes transientes causados pela manobra de capacitores.
- Contatores de alimentação dos capacitores devem ser sobre dimensionados em relação àqueles aplicados em manobra de motores. Alguns destes dispositivos são equipados com bobinas de In-rush.
- Contatores podem ter seus contatos danificados na ocorrência de desligamentos e religamentos consecutivos causados (por exemplo) por afundamentos de tensão.
- Cargas podem ser afetadas quando as concessionárias manobram seus capacitores nas redes de distribuição.
- Proteção a transientes e surtos devem ser especificadas.
- Caso o capacitor seja mantido inserido no circuito em situação de baixa carga poderão ocorrer sobretensões até que os capacitores sejam desligados.

Manobra estática:

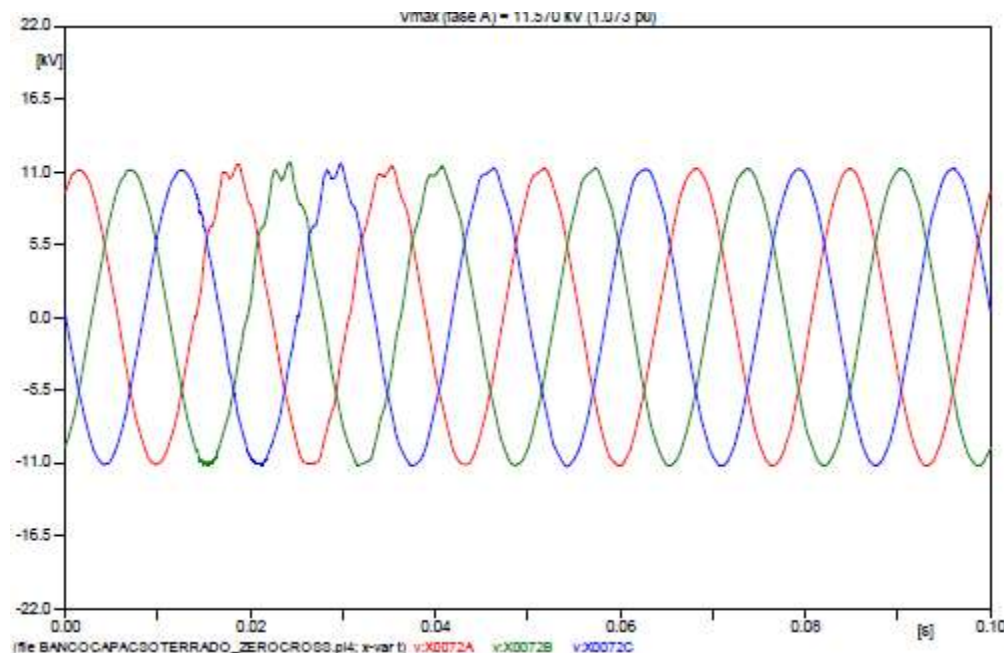
A manobra estática de capacitores pode ser uma ferramenta que possibilita a injeção de energia reativa com a isenção de transientes de manobra (desde que o equipamento seja capaz de sincronizar a partida). A função denominada "zero crossing" permite que os capacitores sejam manobrados (quer na entrada ou na saída) sem transiente de manobra por conta de controle adequado. As figuras 3.2 e 3.3 apresentam o comportamento da manobra de um banco de capacitores sem manobra sincronizada e outro com manobra sincronizada. Neste caso de manobra estática, o sistema não é submetido a estes transientes e não há problemas de transientes.

Figura 3.2 – Transiente de tensão em manobra mecânica de capacitores (sem sincronismo)



Fonte: Durga Bhavani Mupparty
University of Kentucky

Figura 3.3 – Comportamento da forma de onda de tensão em manobra estática de capacitores (sincronizada)



Fonte: Durga Bhavani Mupparty

University of Kentucky

Os transientes ilustrados na figura 3.2 são aleatórios e dependem do instante (na senoide) em que a manobra é efetuada; no caso do desligamento parte da energia do capacitor será dissipada no contator e na rede causando transientes.

Capacitores devem possuir em seu corpo elementos de descarga como resistores ou reatores e só devem ser reinseridos nos circuitos após o descarregamento no caso de manobra convencional (mecânica).

A especificação da manobra depende fundamentalmente do tipo de carga que se está manobrando e os impactos na qualidade da energia das redes elétricas.

PARTE 4–Velocidade de manobra de capacitores

Além da isenção de transientes (tratado no capítulo anterior), outro tema que merece atenção é a velocidade de manobra dos capacitores. Considerando-se que a velocidade de manobra das cargas pode ser extremamente rápida, é de se esperar que ocorram flutuações de tensão durante os instantes de variação da carga, em outras palavras a tensão irá flutuar em função da solicitação da carga à rede em que está conectada.

Quando compensadores de energia reativa estão ligados a sistemas em que grupos de cargas rápidas e variáveis estão conectadas e em função da potência de curto circuito das fontes os resultados podem ser amplificados em função das variáveis envolvidas (comportamento da carga, do compensador e capacidade da fonte). Sob o ponto de vista de qualidade da energia, quanto melhor for a regulação da tensão (tensão tão próxima quanto possível à nominal independente do comportamento da carga); melhor.

Nesta situação, a energia reativa consumida pela carga deveria ser injetada (compensada através dos capacitores) na mesma proporção. Além da preocupação apresentada no artigo anterior, relacionada aos transientes causados por sistemas de compensação durante os instantes de manobra (conexão e desconexão), outro ponto deve ser considerado; o tempo de injeção de energia reativa após a conexão da carga e principalmente de desconexão após a saída da carga.

Sistemas estáticos de compensação de energia reativa possuem em função de suas concepções de construção e mesmo de algoritmos de controle, condições diversas de operação. Há de se considerar o sistema de controle em “loop fechado”, situação em que o controle é efetuado pelo TC de leitura de cargas e capacitores, ou em “loop aberto” situação em que o controle é feito pelo TC ligado na carga exclusivamente. Ver ilustração nas figura 4.1a e 4.1b:

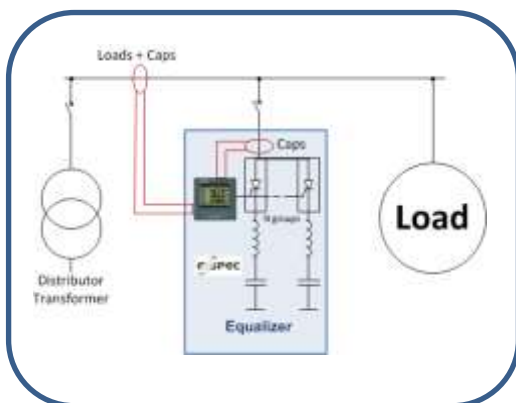


Figura 1a: Esquema de ligação de TC's em loop fechado.
Fonte: Elspec

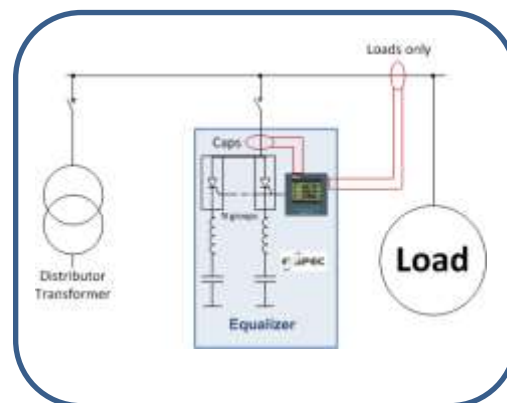


Figura 1b: Esquema de ligação de TC's em loop aberto
Fonte: Elspec

Nestas situações os TC's alimentam o sistema de controle que efetua o controle da injeção de potencia reativa.

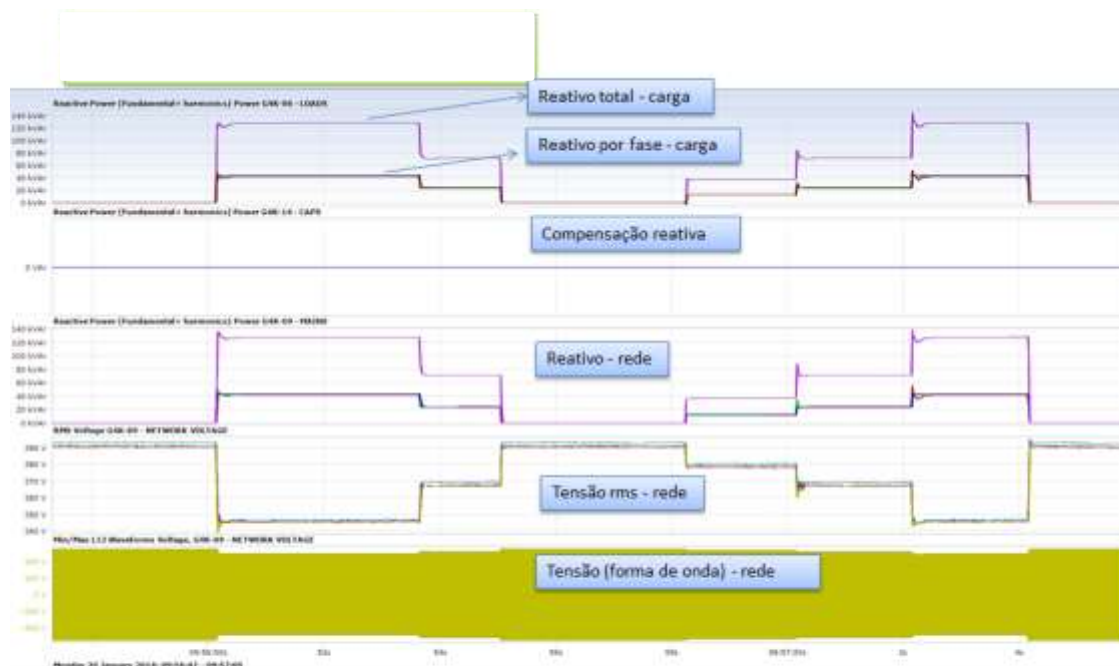
Ensaio desenvolvidos em laboratório e que simularam uma situação típica nos ajudam a interpretar os efeitos. Como exposto, a situação resultante será diferente "caso a caso" em função do tipo da instalação (potencia de curto circuito), comportamento da carga e manobra dos capacitores.

Os ensaios desenvolvidos em laboratório (com controle em loop fechado) consideraram a inserção e desligamentos de uma carga com consumo de reativo específico e compensação de energia reativa por três sistemas estáticos distintos com tempos de manobra de:

- a) 1,8 segundos
- b) 100 milissegundos
- c) 16 milissegundos

Os resultados seguem nos gráficos que se seguem e o comportamento da carga segue na figura 4.1:

figura 4.1 – comportamento da carga

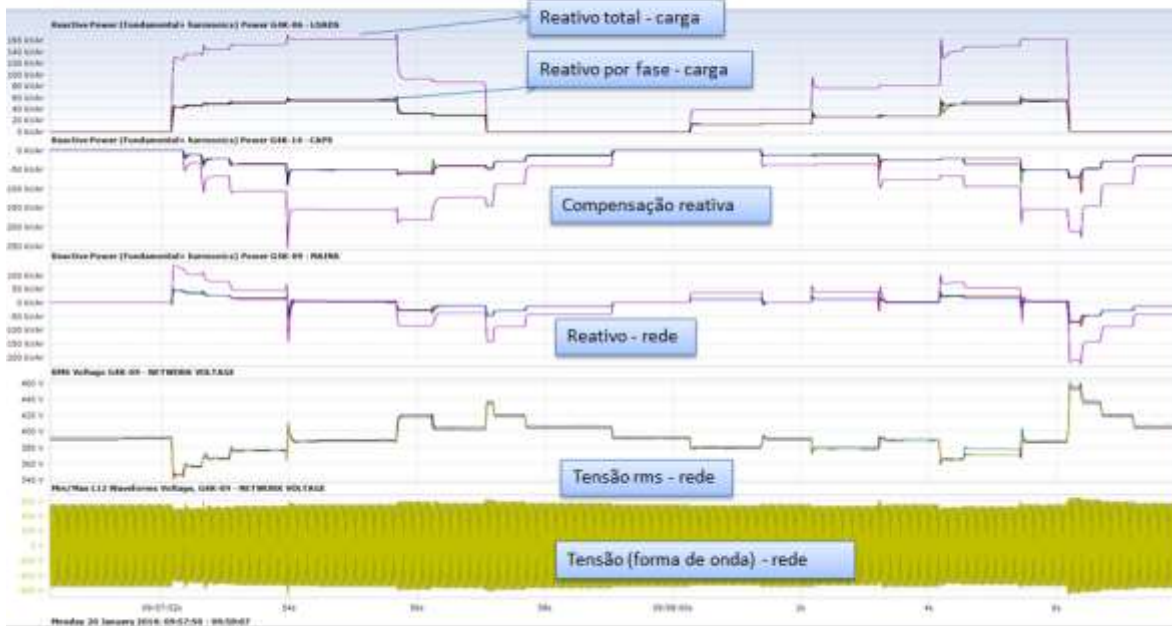


Notas: Sistema sem compensação; comportamento do reativo da carga = reativo da rede
Afundamento de tensão: 45V/20V/etc durante operação da carga

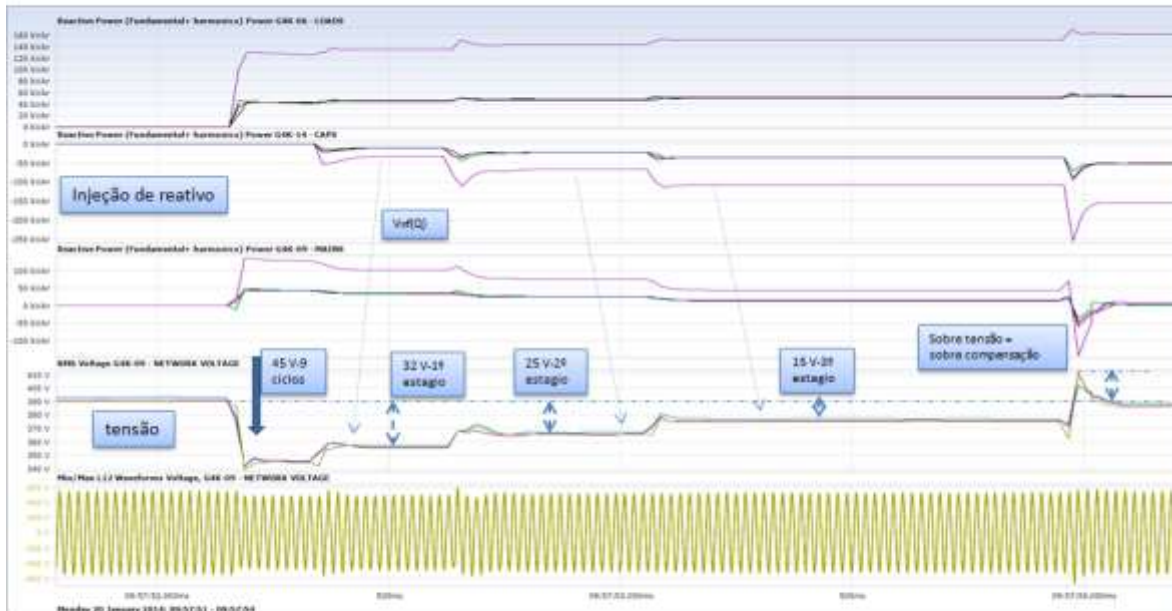
Sem compensação reativa o afundamento de tensão depende totalmente do comportamento da carga, no instante que o reativo é consumido pela carga a tensão chega a apresentar um afundamento superior a 10%..

O primeiro sistema a ser avaliado é um sistema considerado como lento com resposta plena em 1,8 segundos com manobra dos capacitores grupo a grupo (manobra não simultânea). As figuras que se seguem detalham “zoom” de início e final da operação da carga.

a) Compensação em 1,8 segundos



Zoom – início do período

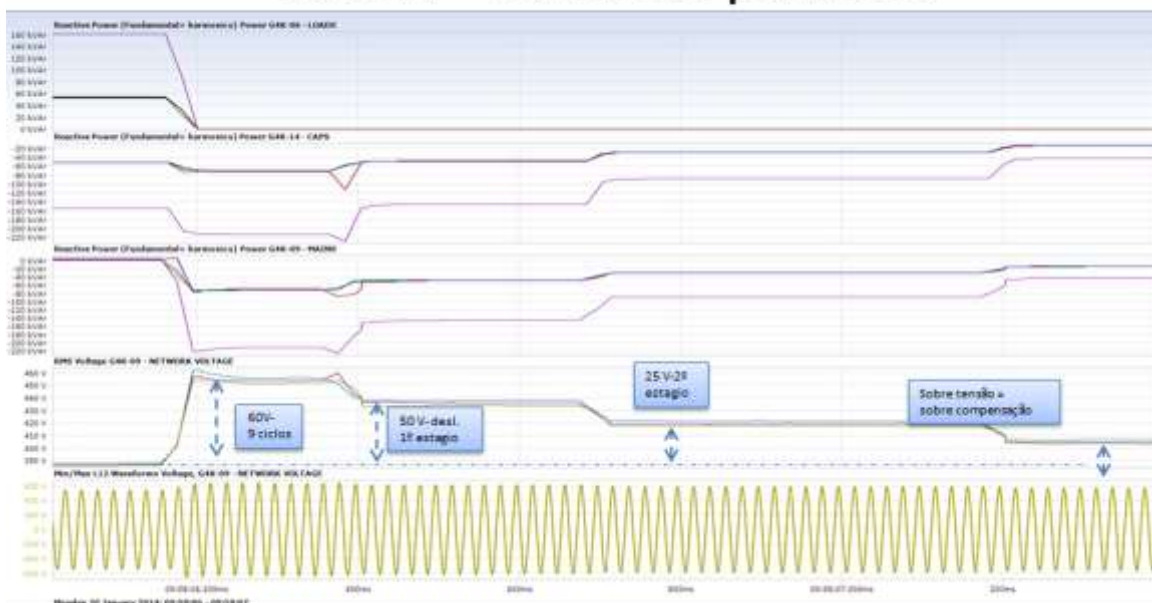


Notas: $Q_{rede} = Q_{carga} - Q_{compensador}$

Afundamento de tensão é mantido em função do “tempo do compensador”

Dependências da Tensão dos estágios e ajustes

Zoom – Final do período



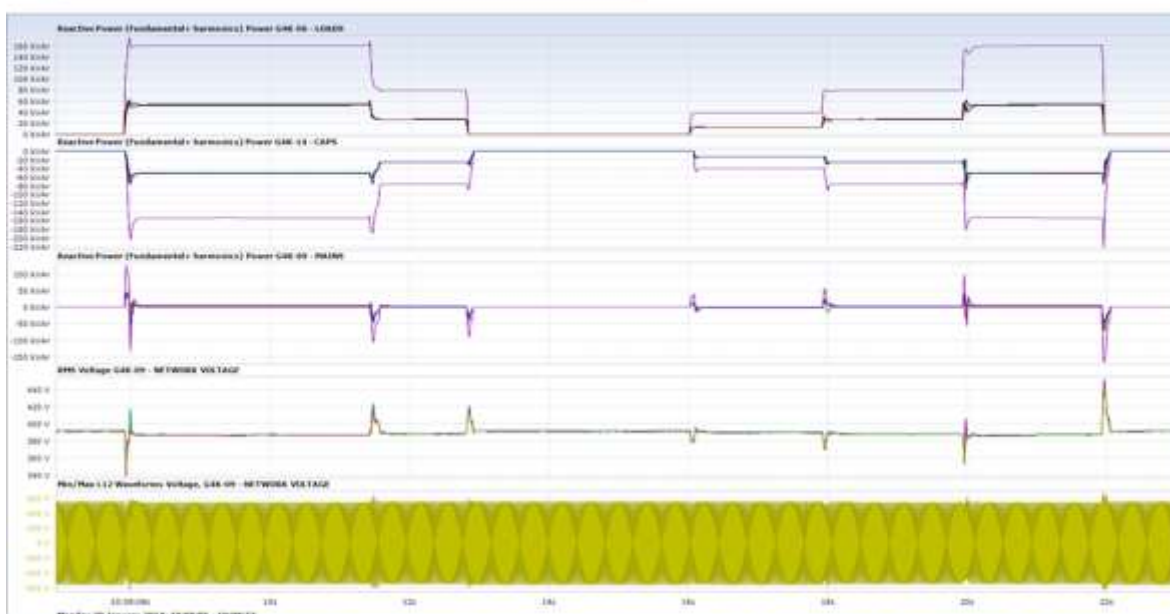
Da análise detalhada dos períodos em que as cargas são inseridas e desligadas observa-se:

-No instante de inicio de operação da carga, observa-se que a tensão somente se estabiliza quando todos os grupos são inseridos, existe uma clara dependência da tensão com a falta de compensação reativa.

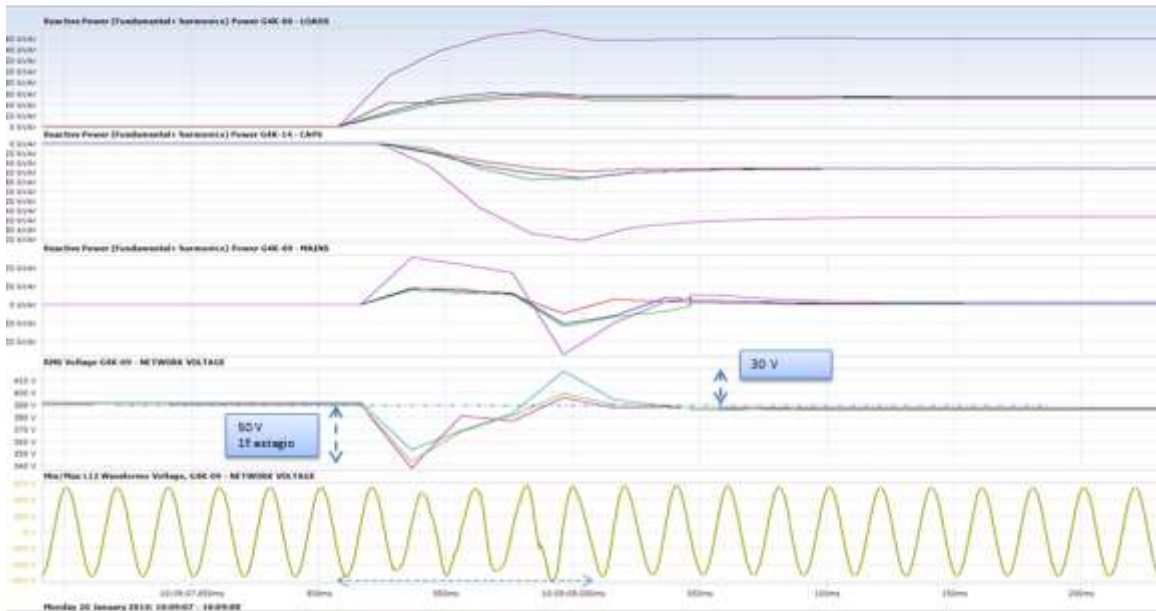
-Já no instante do desligamento da carga, o atraso do desligamento do sistema de compensação, causara sobre tensão em função das relações citadas (potencia de curto e reativo injetado sem consumo de reativo pela carga).

A compensação em 5 ciclos e manobra também não simultânea tem um comportamento mais favorável que o anterior.

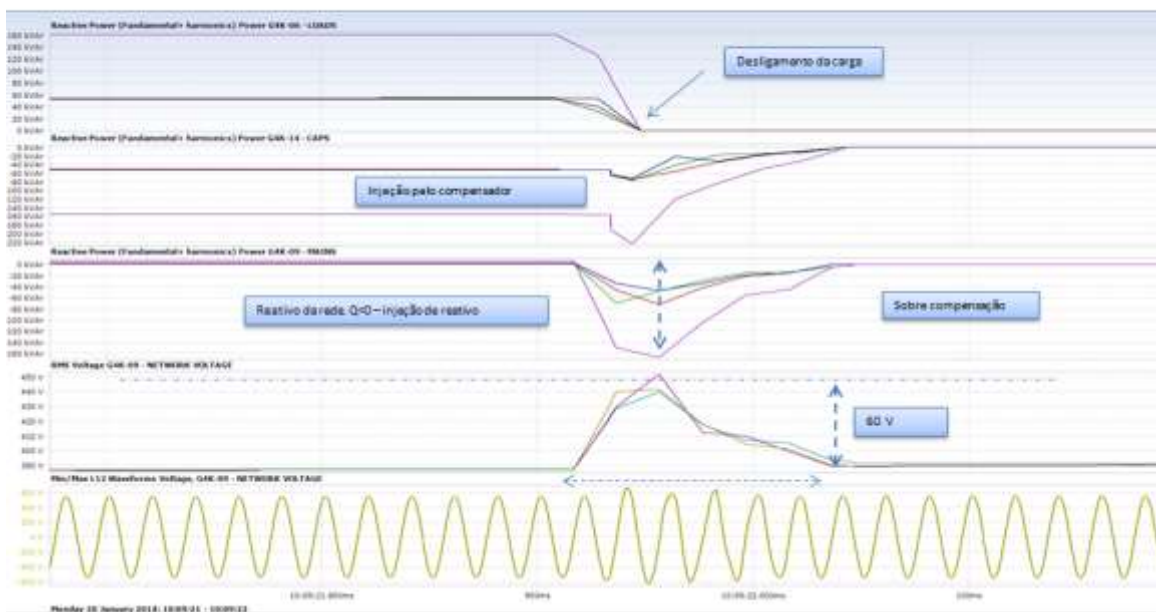
b) Compensação em 5 ciclos



Zoom-Início do período



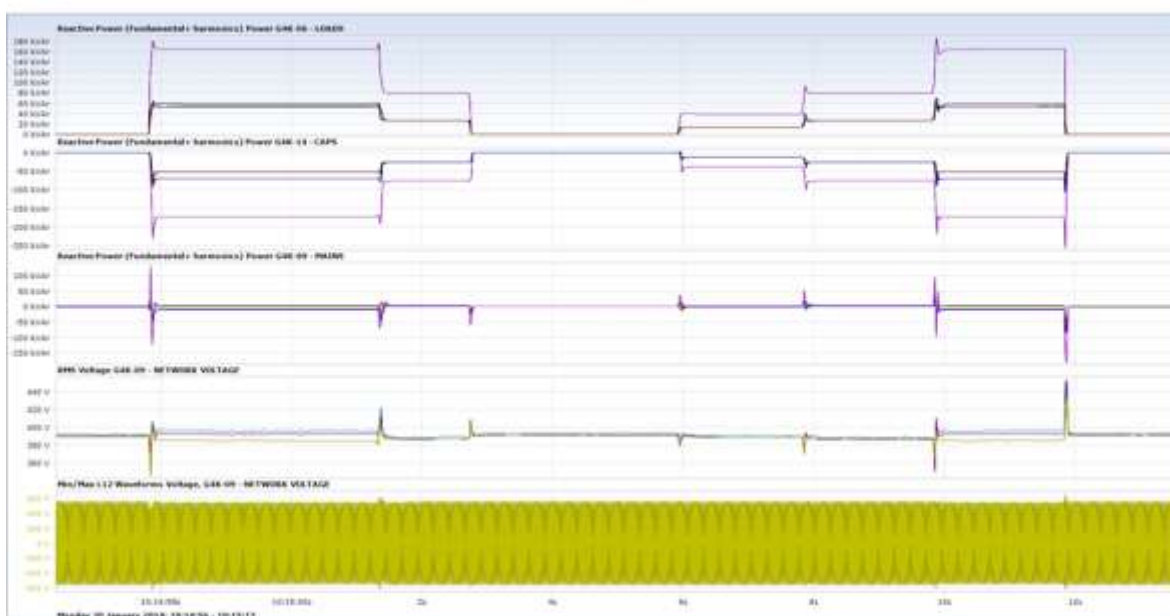
Zoom-Fim do período



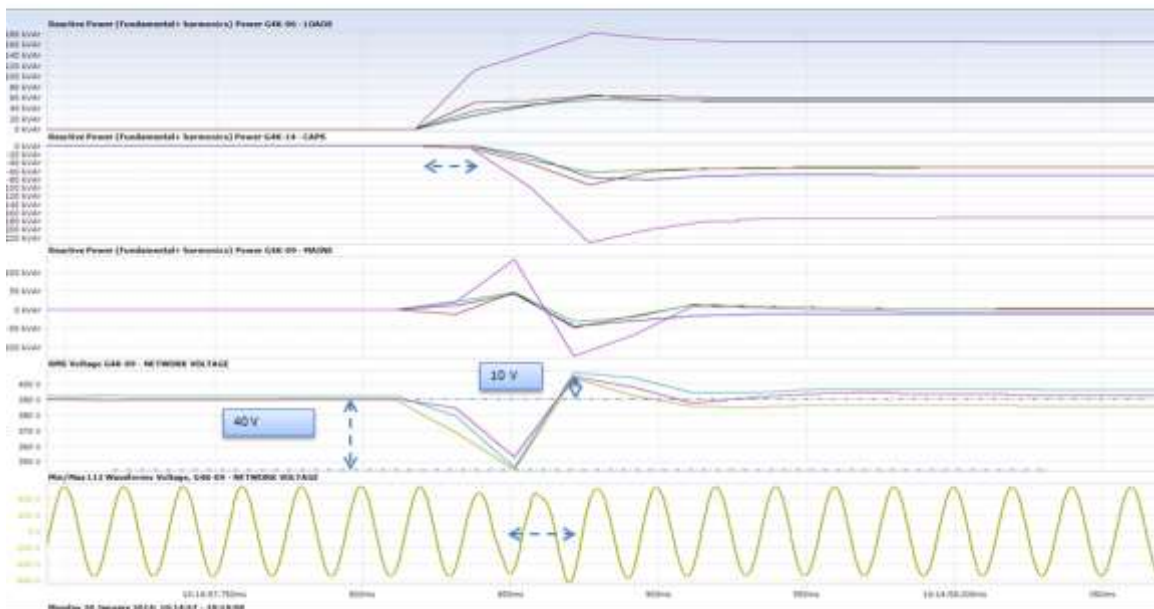
Apesar da resposta mais rápida, observa-se durante 3 ciclos a ocorrência de sobre tensão que pode ser importante em função da sensibilidade das cargas ligadas aos barramentos.

A compensação em um ciclo otimiza a operação conforme a figura c) e as que se seguem com detalhes;

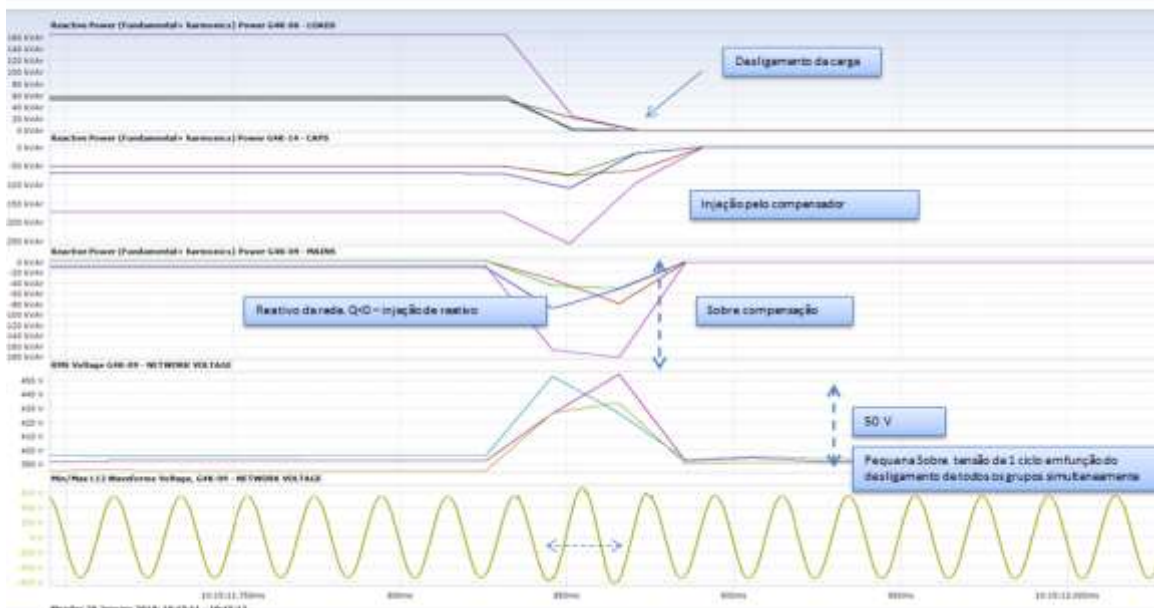
c) Compensação em 1 ciclo



Zoom-Início do período



Zoom-Fim do período



A compensação em um ciclo permite que o sistema se estabilize neste período. Adicionalmente os grupos de capacitores são manobrados



simultaneamente em função da característica própria do controle deste compensador.

O ensaio efetuado confirma as previsões iniciais e serve como subsidio para especificações de sistemas de compensação reativa não só a manobra estática, ao controle, mas também a capacidade do sistema manobrar os grupos simultaneamente, em que intervalo de tempo a manobra é efetuada e os efeitos na tensão do sistema onde fontes, cargas e os compensadores estão conectados.