



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E INOVAÇÃO

RELATÓRIO FINAL

**“ESTUDO DE UMA REDE PARCIAL DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA: ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO, PROTEÇÃO E ALOCAÇÃO DE
BANCO DE CAPACITORES”**

NOME DO BOLSISTA: TÁSSIA MANTELLI GÖRGEN

NOME DO ORIENTADOR: MARCELO SEMENSATO

DATA DE INGRESSO COMO VOLUNTÁRIO (MÊS/ANO): AGOSTO/2011

NOME DO CURSO: ENGENHARIA ELÉTRICA

PERÍODO QUE ESTÁ CURSANDO: 9º PERÍODO

É BOLSISTA DE RENOVAÇÃO: () SIM (X) NÃO

JATAÍ, JULHO DE 2012

1 – Identificação do Projeto e Componentes

Título do Projeto: Estudo de uma rede parcial do sistema de distribuição de energia: Análise de Curto-Circuito, Proteção e Alocação de Banco de Capacitores

Bolsista: Tássia Mantelli Görgen

Orientador: Marcelo Semensato

Local de execução: IFG – Câmpus Jataí

Vigência: Agosto/2011 a Julho/2012

2 – Introdução

O segmento de distribuição de energia elétrica se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado à entrega de energia elétrica ao usuário final. E por ser o último elo do sistema e operar diretamente ligado ao consumidor deve operar com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade. Atualmente a energia elétrica está disponível a um maior número de consumidores e disponibiliza um montante maior de carga. Essa expansão tem exigido do setor maior responsabilidade na operação e mais qualidade a energia distribuída.

Tanto as distribuidoras, quanto os operadores e o meio acadêmico tem procurado dar mais atenção ao setor. Em geral, o objetivo dos estudos se resume em melhorias na operação e na qualidade da energia. Este projeto propôs rever os critérios de dimensionamento das redes e alocação de dispositivos que tragam melhoria no fornecimento da mesma.

Os principais problemas encontrados nas redes de distribuição são as perdas na linha de distribuição e a falta de seletividade e coordenação nos dispositivos de proteção. Mas de nada adianta estudos aprofundados se os resultados não tiverem como produto algo de fácil manipulação e de execução viável para que possa ser implantado. Os estudos devem promover soluções práticas e eficazes se o objetivo for resolver os problemas.

A linha de pesquisa deste projeto é extremamente importante para uma operação mais confiável e eficaz das redes de distribuição de energia elétrica. A proteção das linhas e a alocação de banco de capacitores quando feitos sem estudos e algoritmos de otimização podem elevar os gastos da rede em operação normal e agravar os problemas durante as falhas.

Este projeto teve como objetivo o estudo do fluxo de potência de uma rede parcial de distribuição de energia da presente cidade, e a locação dos dispositivos de proteção e de banco de capacitores com a finalidade de otimizar a operação tornando-a mais confiável e econômica. O processamento dos dados reais do circuito possibilitou uma comparação do que se tem implantado e o desenvolvimento de sugestões de melhoras ao sistema, tanto pelo dimensionamento como pela locação dos dispositivos.

O fluxo de carga é um problema matemático, cujo objetivo é determinar as tensões e potências em todos os barramentos de um sistema elétrico. Dessa forma é possível dimensionar redes de distribuição e demais equipamentos que farão parte do sistema, bem como operá-los corretamente, de modo a manter os padrões adequados de tensão.

A operação correta dos sistemas também depende do conhecimento dos níveis de curto-circuito em cada barramento, do modo que sistemas adequados de proteção possam ser dimensionados. Em linhas gerais, o problema de curto-circuito nada mais é do que um problema de fluxo de potência na qual uma das barras é submetida a condições de curto, ou seja. É forçada a manter tensão nula ou quase nula. O curto, mais propriamente denominado falta, pode ser simétrico, como nos casos dos curtos trifásicos e trifásico-terra, ou assimétricos, como nos casos dos curtos fase-terra, fase-fase ou fase-fase-terra. Sendo um problema de fluxo de potência em condições excepcionais, poderíamos no princípio usar os métodos de fluxo de potência para resolver problemas de curto-circuito. Contudo, no caso dos curtos assimétricos, o problema se torna mais complexo, pois as correntes em cada uma das fases serão diferentes. Por isso, em situações de curto podemos fazer algumas simplificações no sistema e podemos também usar o método das componentes simétricas, o que permitirá conhecer as correntes e potências de curto em cada uma das barras do sistema.

Os dados da linha de distribuição foram obtidos junto à concessionária CELG. E através do algoritmo foram calculados os fluxos de potência na rede e o cálculo de curto-circuito. Através destes cálculos foi possível dimensionar toda a proteção e coordenação da rede e a alocação dos bancos de capacitores para diminuir as perdas nas linhas.

Para a simplificação da manipulação e processamento dos dados, todas as grandezas envolvidas no sistema foram colocadas no sistema por unidade. Sendo que a tensão de base é a tensão nominal da rede do circuito em questão 13,8 kV e a potência de base é 10 MVA, que representa uma potência menor do que a quantidade de cargas nominais conectadas ao sistema.

3 - Material e Métodos

3.1 Materiais:

- Computador com processador Intel Dual Core (pessoal)
- Software MatLab 7.0 (pessoal)

3.2 Métodos:

Para o cálculo do fluxo de potência foi escolhido o método da soma das potências ou método de Céspedes, que demonstrou ser um método simples e eficiente para cálculos de fluxo de carga para sistemas de distribuição radial. Sendo o método baseado em um circuito equivalente e o uso de magnitude de tensão única eliminando o ângulo de fase de tensão. Sendo que o mesmo método pode ainda incluir outros recursos de análise baseado nas restrições dos níveis de tensão da rede.

Sendo que o circuito equivalente é composto pela modelagem de uma linha de distribuição que é composta pelos seguintes elementos:

- Impedâncias da rede: representada pela resistência e reatância por unidade, sendo desconsiderada a capacitância shunt da rede.

- Cargas: todas as cargas conectadas a rede inclusive os bancos de capacitores utilizados para compensação da energia reativa. São representados pelas componentes ativos (P) e reativos (Q) em sistema por unidade.

A linha de distribuição é modelada em ramos e nós. Sendo que a numeração do ramo é concidente com a numeração do nó do final do mesmo.

Para a primeira iteração é realizado a soma das potências conectadas a rede, sendo que partindo do último nó e seguindo em direção à fonte. As demais iterações acontecem da fonte em direção ao último nó, de forma a ajustar os valores de tensão com as cargas e as impedâncias da rede.

Para convergência do cálculo é proposto a solução da seguinte equação:

$$V_r^4 + [2 * (PR + QX) * V_s^2] * V_r^2 + (P^2 + Q^2) * (R^2 + X^2) = 0$$

Onde

s: do lado do nó fonte;

r: lado da carga ou receber nó;

Vs: fonte de magnitude de tensão do lado;

Vr: magnitude de tensão de carga lateral;

P, Q: carga ativa e reativa, valores fixos;

R, X: resistência e reatância ramo, valores dependentes da tensão;

Perdas ativa e reativa como último necessária pode ser calculada da seguinte forma:

$$L_p = R * (P^2 + Q^2) / V_r^2 \quad (4)$$

$$L_q = X * (P^2 + Q^2) / V_r^2 \quad (5)$$

Onde

Lp: perdas ativas do ramo;

Lq: perdas reativas do ramo;

O método utilizado pode ser resumido no seguinte algoritmo:

- 1) Formular a matriz de dados, incluindo parâmetros, a magnitude de tensão na fonte e nos nós e cargas conectadas a rede em tensão nominal.
- 2) Assumir uma magnitude de tensão para cada nó para o cálculo da estimativa de carga e do cálculo de cargas depende da magnitude de tensão.
- 3) Calcular o equivalente para cada nó somando todas as cargas alimentadas pela rede através do nó, incluindo as perdas.
- 4) A partir da fonte e usando a equação, calcular a tensão de carga (Vr) para todas as cargas.
- 5) Com a nova tensão recalculando as perdas. Se a variação total de perdas em relação ao valor anterior calculado é maior do que um erro especificado, voltar para a etapa 3). Caso contrário, calcular todos os outros resultados necessários, tais como correntes, por exemplo.

A princípio foram utilizadas as cargas nominais dos transformadores conectados a rede, que representaram as potências consumidas pelos clientes ligados a cada transformador, usando fator de potência 0,92, como sendo um horário de pico. A maioria dos alimentadores estão carregados de maneira desequilibrada, esta natureza causa dificuldade na análise de um alimentador de distribuição, pois é onde ocorrem perdas elétricas devido as seguintes razões: perdas nos condutores, perdas nos núcleos e nos enrolamentos de transformadores, perdas devido as características da carga e perdas devido ao desequilíbrio de carga na fase.

A escolha da bitola e comprimento dos condutores normalmente limita as perdas nos condutores de fase. A introdução de sistemas monofásicos causam perdas adicionais no condutor neutro. As perdas no núcleo de transformadores de distribuição são sensíveis a magnitude da tensão do sistema, a qualidade do transformador também afeta estas perdas. Considerando que a carga varie dia e noite e de uma estação do ano para outra estação do ano, o fator de potência do alimentador varia

conjuntamente. As características da carga também representam um papel na distribuição das perdas do sistema. Durante o período de pico, a tensão ao longo de um alimentador pode cair significativamente abaixo do valor nominal. É muito importante durante esses períodos que a característica de carga seja modelada com precisão para propósitos de análise de perdas de energia, isto é igualmente verdade para períodos de operação de alta tensão. Devido a complexidade e a dificuldade na obtenção de dados precisos para modelagem e análise detalhada de um sistema de distribuição completo, é necessário focar o estudo em uma porção selecionada do sistema, que apresente as características gerais das redes de distribuição. Por isso foi escolhido como objeto de estudo o Circuito 1 da subestação Jataí, visto que ele distribui energia predominantemente para consumidores urbanos e em baixa tensão.

A concessionária nos cedeu informação dos postes, das estruturas e do cabo utilizado. Dessa forma foi possível chegar aos valores das impedâncias da rede e transforma-las em grandezas por unidade para inclui-las na matriz de dados.

Após o cálculo de fluxo de potência foi elaborado o script responsável pelo cálculo da corrente de curto circuito. O objetivo maior do cálculo das correntes de curto circuito é a alocação e o dimensionamento dos dispositivos de proteção e seletividade. A metodologia utilizada para a elaboração do programa, foi a do cálculo de correntes de curto-circuito em sistemas desequilibrados, que trata o sistema desequilibrado como três sistemas equilibrados, sendo um de sequência positiva, um de sequência negativa, que para sistemas de distribuição radiais as matrizes de sequência positiva e negativa são iguais, e um de sequência zero, e o cálculo foi efetuado para as faltas fase-terra, fase-fase (bifásico e trifásico). Para este cálculo foi elaborada uma matriz com as impedâncias correspondentes a cada sequência.

Na elaboração de projetos de proteção em sistemas aéreos de distribuição, levou-se em consideração que o aspecto da proteção de materiais e equipamentos é um dos objetivos, mas não se constitui em sua finalidade única. Considera-se que esse objetivo, em princípio, já deve ter sido atingido no âmbito dos esquemas de proteção da subestação e, portanto, a proteção de distribuição pode dar ênfase ao aspecto da continuidade do suprimento, evitando que uma falta tenha um envolvimento muito grande em termos de carga e/ou consumidores atingidos, além de procurar reduzir os tempos de localização dessa falha e de reposição do sistema em serviço. Para minimizar os efeitos produzidos pelas correntes de falhas e pensando na viabilidade de implantação foram previstas a utilização de chaves-fusíveis munidas de elos fusíveis.

A coordenação de elos fusíveis é realizada através das curvas de tempo x corrente dos elos-fusíveis, lembrando que a coordenação é satisfatória quando o tempo total de interrupção do elo-fusível protetor não excede 75% do tempo mínimo de fusão do elo-fusível protegido. Foi prevista uma coordenação satisfatória entre elos-fusíveis do tipo K até uma corrente igual a 13 vezes a nominal do elo-fusível protegido.

Para a alocação de banco de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizamos os resultados do fluxo de potência, visando a compensação da potência reativa das cargas, reduzir a potência fornecida pelo sistema, reduzir as perdas de energia, melhorar o perfil de tensão e, em menor medida, aliviar a capacidade do sistema. Logo a alocação dos bancos de capacitores visa reduzir os custos de operação do sistema diminuindo as perdas.

Tendo a energia reativa a ser compensada foi possível determinar os melhores pontos de instalação desses bancos, os tipos e tamanhos e principalmente o esquema de controle para esses bancos para o caso de operação em diferentes níveis de carga. A função objetivo consiste em minimizar os custos de operação para um horizonte de operação especificado e as restrições são as equações de fluxo de carga e as restrições de operação tais como os módulos de tensão de barra.

Para o correto dimensionamento e viabilização de implantação foram buscados fornecedores já conhecidos da concessionária e com modos de operação facilitados com o objetivo de simplificar a operação dos mesmos por parte dos funcionários da própria concessionária.

Como a modelagem da carga é fixa, a compensação da energia reativa só obtém êxito para a situação modelada. Daí a importância de se prever a instalação de banco de capacitores com acionamento automático, conectando proporcionalmente suas células capacitivas conforme a necessidade de compensação do sistema.

4 – Resultados

Através do desenvolvimento do projeto pode-se chegar a um estudo detalhado da rede de distribuição em média tensão 13,8 kV. O programa alcançou ótimos índices de convergência para o cálculo de fluxo de potência e correntes de curto-circuito. E também se apresentou prático e eficiente para alocação de banco de capacitores.

Após o desenvolvimento do algoritmo foi possível confrontar o dimensionamento e a alocação dos dispositivos no circuito pelo projeto e pela concessionária. Sendo que os cabos alimentadores da rede foram considerados os mesmos com vistas a matriz de dados que possui as impedâncias da rede dependentes do tipo de cabo escolhido.

Para a alocação dos dispositivos de proteção foram escolhidos os mesmos critérios da concessionária no que diz respeito ao seccionamento de cada transformador, pois o dispositivo de seccionamento – chave fusível – irá isolar apenas o transformador e não seccionará o circuito, assim sendo optamos por manter o mesmo dimensionamento escolhido pela concessionária, que é baseado na corrente nominal do transformador, como pode ser verificado pela tabela abaixo:

Tabela 1 – Dimensionamento de elos fusíveis para transformadores de distribuição

	Potência do transformador	Tensão da rede 13,8 kV
		Elo
Monofásico	5 kVA	1 H
	10 kVA	1 H
	15 kVA	2 H
	25 kVA	3 H
	37,5 kVA	5 H
Trifásico	15 kVA	1 H
	30 kVA	2 H
	45 kVA	2 H
	75 kVA	5 H
	112,5 kVA	6 K
	150 kVA	8 K
	225 kVA	10 K
	300 kVA	12 K
	500 kVA	25 K

Para o dimensionamento dos dispositivos de seccionamento do circuito foram considerados as correntes de curto-circuito encontradas no cálculo. Para a alocação desses dispositivos foram considerados os pontos estratégicos levando-se em consideração principalmente as derivações e as cargas que estão alimentadas. Os critérios são baseados levando em consideração os critérios que a ANEEL estabelece como prioridades.

Assim sendo, as chaves fusíveis foram sugeridas para locação em determinados pontos onde não havia nenhum dispositivo de seccionamento. De forma a isolar apenas o trecho ou o menor trecho possível da falta, mantendo a continuidade do fornecimento para os demais trechos. O dimensionamento foi realizado com vistas aos princípios de coordenação e seletividade. Tivemos o cuidado de dimensionar os elos fusíveis e dar prioridade para os valores que a concessionária já trabalha com o intuito de tornar ainda mais viável as melhorias na rede.

Para a alocação dos bancos de capacitores os resultados foram satisfatórios, pois é possível demonstrar que se faz necessário a instalação de bancos de capacitores no circuito em questão e que a concessionária não possui nenhum em operação. Vários são os clientes que possuem problemas com a baixa qualidade de energia da rede, mesmo aqueles clientes atendidos por tensão primária. Dando atenção especial a laboratórios e demais estabelecimentos que possuem equipamentos sensíveis a determinados níveis de tensão.

A implantação da alocação desses bancos de capacitores é viável devido a existência de normatização da própria concessionária CELG para estruturas que o abrigam. Uma consideração a ser feita diz respeito a operação dos bancos de capacitores, visto que todos os cálculos realizados atendem a uma situação estática, logo, para o desempenho adequado do banco de capacitores se faz necessário um dispositivo de acionamento automático, que conectaria proporcionalmente a necessidade cada célula capacitiva. De modo a realizar uma compensação mais exata da energia reativa da rede.

5 - Conclusão

Os resultados obtidos permitem a comparação da atual configuração e operação da rede com a proposta pelo projeto. E tornou possível a análise da locação e atuação dos dispositivos de seccionamento e de compensação.

Com base nesses resultados é possível viabilizar as melhorias na rede, principalmente porque as sugestões incluem materiais que a concessionária possui em estoque e que já possui pessoal treinado para instalação e operação. Com exceção apenas do banco de capacitores e seu respectivo dispositivo de acionamento automático que deveriam ser adquiridos para instalação.

Durante o desenvolvimento do projeto foram encontradas dificuldades para se lançar os dados e converte-los em dados para a formulação da matriz dados utilizada no código de cálculos. A dificuldade de se encontrar as reais grandezas de conversão de impedância dos cabos de acordo com o cabo e os espaçamentos. Visto que todas as conversões foram realizadas considerando a situação ideal dos espaçamentos e como se os cabos fossem novos, desprezando os efeitos do tempo sobre a rede.

A perspectiva de continuidade do trabalho se baseia na inclusão de mais variáveis a serem analisadas, principalmente no que diz respeito aos indicadores de qualidade de energia. Além da injeção de correntes harmônicas na rede.

Os resultados obtidos demonstram que mesmo redes de distribuição em pleno funcionamento e operação são passíveis de melhorias. Melhorias estas que não acarretam grandes investimentos. Os grandes investimentos podem ser destinados a expansão das redes de distribuição de forma a atender mais clientes ou ainda destinados a melhoria nos alimentadores de grandes cargas, para que assim mais pessoas pudessem ser contempladas com energia elétrica que a fosse disponibilizada em maiores quantidades de forma a incentivar o desenvolvimento de indústrias e fábricas.

O circuito em questão pode ter sofrido alterações de modo que os dados coletados com a concessionária estejam em desacordo com o real. As tabelas de conversão de impedâncias podem não ser as mais adequadas, de forma que uma revisão na formulação da matriz dados seria suficiente para diagnosticar as fontes de erro. Embora haja chances de erro, os resultados apresentados apresentariam mudanças pouco relevantes.

O prolongamento do projeto para o desenvolvimento desse estudo poderia trazer mais êxito as análises e mais critério para todos os parâmetros em questão.

6 – Perspectivas de continuidade ou desdobramento do trabalho

Durante o período ao qual se refere este relatório foi desenvolvido um script para o cálculo do fluxo de potência de uma rede de distribuição radial, da corrente de curto-circuito e o de dimensionamento de bancos de capacitores. Todo esse script foi testado utilizando os dados de um circuito da concessionária CELG do município de Jataí. O projeto alcançou os objetivos esperados para o mesmo.

O aperfeiçoamento desse projeto poderá buscar a elaboração de uma matriz de dados mais precisa, buscando uma fonte de dados fiel as grandezas envolvidas. E podem-se buscar diversas modelagens buscando a realização do processamento de dados para diversas situações. Se aproximando mais de um processamento em tempo real, assim a análise desses dados seria mais coerente.

A continuidade desse projeto poderá buscar o aperfeiçoamento do método incluindo os cálculos com a injeção de correntes harmônicas na rede ou ainda a elaboração de uma interface gráfica para a facilidade de interpretação de uma operação. Além de poder incluir outros parâmetros para outras análises.

7 – Publicações e participações em eventos técnico-científicos

8 – Apoio e Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, pela oportunidade disponibilizada.

Ao Cláudio Antônio Furtado de Souza e Melo, CELG – Unidade de Jataí, que colaborou para a execução deste projeto disponibilizando os dados para a modelagem da rede.

9 – Referências Bibliográficas

10 – Bibliografia

ALMEIDA, Álvaro Augusto W. de. Sistemas Elétricos de Potência – Notas de aula. UTFPR: Curitiba, 2011

BARBOSA, Ailson de Souza. Fluxo de potência em sistemas de distribuição: aplicações práticas. UFP: Campina Grande, 1995.

BEÊ, R. T. Alocação de Banco de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos. Dissertação de mestrado; Curitiba, 2007.

CESPEDES, R. New Method for the Analysis of Distribution Networks. IEEE, 1990.

CCON. Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição. Editora Campus/Eletróbrás, Rio de Janeiro, 1982.

FELTRIN, A. P.; DENIS, I. F. E. D.; MANTOVANI, J. R. S.; SILVA, L. G. W.; PEREIRA, R. A. R.; FEPISA F. C. SPADA; NOVELLI, G. C., LOUZADA, H. C.; BONAVERA, L. T.; OKUYAMA, R. Y.. Desenvolvimento de software eficientes para melhoria de desempenho de redes de distribuição. CITENEL.

IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems. IEEE, 2001.

KINDERMANN, Geraldo. Curto circuito. Editora Sagra Luzzato: Porto Alegre, 1997.

NETO, A. C; PACHECO, M. A. C. Alocação Ótima de Banco de Capacitores em Redes de Distribuição Radiais para Minimização das Perdas Elétricas. Revista de Inteligência Computacional Aplicada, p. 1-10.