

Arranjos de Sistemas de Distribuição Elétrica para Instalações de Médio e Grande Portes

Eng. Marcos Isoni – ENGEPARC ENGENHARIA Ltda

• Introdução Geral

Sistemas de distribuição elétrica são freqüentemente selecionados unicamente com base na perspectiva de um menor investimento inicial. Essa é uma prática muitas vezes imediatista, que, geralmente, resulta na implantação de sistemas que, na realidade, não se constituem como os tecnicamente mais adequados e nem como os de maior economicidade, quando analisados à luz de todos os fatores que podem interferir na operação normal e na performance requerida para as instalações elétricas.

Na fase de projeto básico, objetivando-se selecionar com critério o sistema mais aplicável, é altamente recomendável que todas as principais características das configurações possíveis para um sistema de distribuição interna sejam devidamente avaliadas tornando-se como base os requisitos dos blocos de carga a serem alimentados. Via de regra e a priori, podem-se definir 6 principais fatores para análise: investimento inicial, flexibilidade, continuidade de serviço, regulação de tensão, custos operacionais e custos com manutenção.

Do ponto de vista global, o melhor sistema será o que proporcionar a melhor conjugação desses fatores e, conseqüentemente, o “serviço eletro-energético” mais adequado. Portanto, é importante salientar que nem sempre (ou, talvez, quase nunca) o melhor sistema será o que venha a incorrer no menor investimento inicial.

A seguir serão sucintamente comentados os aspectos a serem analisados (além do investimento inicial) quando do processo de definição do arranjo para um sistema de distribuição elétrica:

- *Flexibilidade* – Consiste na “habilidade” do sistema em adaptar-se a alterações de condições de carga e/ou a alterações de “lay-out” com um mínimo possível de interrupções de serviço e um mínimo custo de implementação de eventuais adaptações necessárias; diz respeito, em outras palavras, à “capacidade” que um sistema possui de não ser sensivelmente afetado por mudanças na instalação.

- *Continuidade de Serviço / Confiabilidade* – Consiste na medida da magnitude da carga que é retirada de serviço perante faltas em diferentes pontos do sistema, considerando-se as probabilidades de ocorrência de tais faltas em vários pontos de análise; diz respeito aos meios de que o sistema dispõe para minimizar os efeitos de eventuais paralisações e/ou para possibilitar rápidos restabelecimentos de serviço.

- *Regulação de tensão* – Traduz, em linhas gerais, a magnitude das variações de tensão perante variações de carga, a uniformidade de tais variações em vários pontos do sistema e o grau das flutuações súbitas da tensão mediante a aplicação de cargas mais significativas (por exemplo, durante a partida de motores elétricos de maior porte).

- *Custos Operacionais* – Dizem respeito, fundamentalmente, as características operacionais do sistema no que se refere à eficiência energética e, conseqüentemente, à utilização racional da energia elétrica a ser consumida; sua minimização pressupõe a proximidade de subestações a seus centros de carga, a racionalização de percursos de cablagens de alimentação geral em BT e critérios de dimensionamento adequados.

- *Custos com Manutenção* – São influenciados pela natureza, pela magnitude e pela sensibilidade dos equipamentos a serem instalados, e pelo grau de dificuldade/facilidade no que se refere à realização de inspeções, testes e manutenções (preventiva/corretiva) com um mínimo possível de interrupções de serviço.

A busca da otimização de todos esses fatores quando da seleção de uma configuração de distribuição para uma dada instalação elétrica traduz-se na elevação do que se pode denominar “*Eficiência Operacional*”, parâmetro mais abrangente que leva em conta a performance geral de um sistema, sua confiabilidade, sua adaptabilidade e sua estabilidade perante carga leve e carga mais acentuada, desde o(s) ponto(s) de suprimento até os pontos de utilização efetiva da energia elétrica.

A definição do arranjo básico e o detalhamento da configuração do sistema de distribuição dependerão, via de regra, do tipo, dos propósitos de utilização e da segurança operacional necessária à edificação à qual o sistema atenderá. Geralmente as edificações de médio e grande portes enquadram-se em uma dentre quatro classificações básicas, a saber :

- edificações predominantemente verticalizadas (como é o caso dos grandes edifícios comerciais e de prestação de serviços);
- edificações predominantemente horizontalizadas (como é o caso da grande maioria dos *shopping centers*);
- agrupamentos ou conglomerados de edificações de pequeno e médio portes (como é o caso de complexos hospitalares, educacionais, militares e de entretenimento), e
- plantas industriais.

Para cada um desses casos os parâmetros para análise e definição do arranjo de distribuição elétrica podem apresentar “pesos” diferenciados, o que deverá ser avaliado com critério pelos responsáveis pela conceituação e projeto básico do sistema a ser implantado.

Nos parágrafos seguintes serão abordadas as principais características das configurações de arranjos elétricos usualmente adotados em edificações de médio e grande portes, objetivando-se possibilitar aos novos projetistas uma visão mais abrangente e objetiva sobre o assunto. Para os projetistas já experientes, pretende-se que o conteúdo apresentado constitua-se com uma referência básica, objetivando uma reciclagem de conceitos.

• **Considerações Preliminares Sobre Arranjos de Distribuição Elétrica**

Em qualquer rede elétrica interna, o sistema de distribuição engloba os métodos e equipamentos utilizados para o transporte de potência desde a entrada de energia até os dispositivos de proteção geral dos barramentos responsáveis pela alimentação dos circuitos terminais. O sistema de distribuição efetua o “transporte” de potência para quadros de iluminação, painéis de força, centros de controle de motores (CCM's) e para dispositivos de proteção de circuitos terminais destinados à alimentação individual de motores elétricos e demais cargas. Dependendo do tipo de instalação, da potência e da natureza das cargas, de vários fatores econômicos e ainda das condições do local, pode tornar-se conveniente que um sistema de distribuição elétrica opere sob um único nível de tensão ou envolva uma ou mais transformações de tensão. Pode-se tornar também necessário incorporar ao sistema variações de frequência da tensão alternada ou promover retificações para a obtenção de tensão contínua.

O arranjo geral de um sistema de distribuição é, em síntese, uma questão de seleção de arranjos básicos de circuitos e equipamentos de forma a atender às operações e serviços elétricos necessários e adequados às condições pré-estabelecidas de tensão, corrente e frequência. Isto significa correlacionar diversos fatores tais como : tensão de utilização, tensão (ou tensões) de distribuição, condutores, transformadores, conversores, chaves, dispositivos de proteção, reguladores, dispositivos para correção do fator de potência, continuidade de serviço, flexibilidade, eficiência operacional, possibilidade de futuras solicitações de carga (capacidade de reserva), etc. Obviamente, fatores como acessibilidade e segurança também devem ser considerados quando da análise do arranjo de um sistema de distribuição.

Em praticamente todas as instalações cuja tensão de fornecimento por parte da concessionária de energia elétrica é equivalente à tensão de utilização (instalações atendidas em baixa tensão diretamente a partir de uma rede pública) a distribuição interna de circuitos é normalmente implementada através de sistemas radiais simples. Entretanto, quando da execução de um projeto elétrico de médio ou grande porte, para instalações atendidas em tensão primária (média ou alta tensão), o engenheiro responsável pela concepção do arranjo do sistema de distribuição dispõe, de maneira geral, de vários tipos de configurações disponíveis, a saber :

- *Sistema Radial Simples*
- *Sistema Radial com Primário em Anel*
- *Sistema Radial com Secundários Interligados*

- *Sistema Radial com Primário-Seletivo*
- *Sistema Radial com Secundário-Seletivo*
- *Sistema Reticulado Simples*
- *Sistema Reticulado com Primário-Seletivo*

Nos itens seguintes serão caracterizados diversos tipos de arranjos usuais (em disposição básica e/ou modificada) e seus respectivos diagramas unifilares em configuração simplificada. É importante ressaltar que, na prática, as possibilidades são inúmeras e as configurações aqui abordadas podem ser projetadas de maneira mais implementada, notadamente no que se refere à presença de dispositivos de seccionamento e proteção, algumas vezes utilizados até de forma redundante. Entretanto, o objetivo deste artigo consiste na apresentação dos conceitos básicos elementares associados a cada sistema de distribuição abordado.

1 – Sistema Radial Simples

No sistema radial simples convencional (fig.1) a potência solicitada da rede flui por uma subestação onde a tensão de fornecimento é adequada ao nível (ou níveis) de utilização para os equipamentos a serem atendidos. Os alimentadores gerais em baixa tensão são conduzidos a partir do barramento de distribuição geral da subestação até os quadros terminais (ou quadros de distribuição secundária) localizados nos diversos centros de carga. Cada um dos alimentadores gerais é individualmente protegido na subestação geral por um dispositivo de proteção e seccionamento. Desde que cada parcela de carga da instalação é atendida por uma única fonte (transformador), pode-se obter grandes vantagens principalmente no que diz respeito aos fatores de demanda e diversidade. Em outras palavras, isso significa que, dependendo das características operacionais da instalação, torna-se possível utilizar um transformador com potência nominal bem inferior à carga total instalada. Entretanto, em princípio, a regulação de tensão (principalmente durante os transitórios de corrente), a eficiência e a confiabilidade do sistema são pobres devido à distribuição geralmente em baixa tensão e à existência de uma única fonte para cada parcela de carga (ou uma fonte única para atendimento a toda a instalação). Desta forma, verifica-se que a aplicação desse tipo de arranjo não é aconselhável quando os circuitos são muito longos e alimentam centros de carga distantes e com demandas elevadas. Nesses casos, os custos dos condutores necessários para que não haja quedas de tensão inadmissíveis.

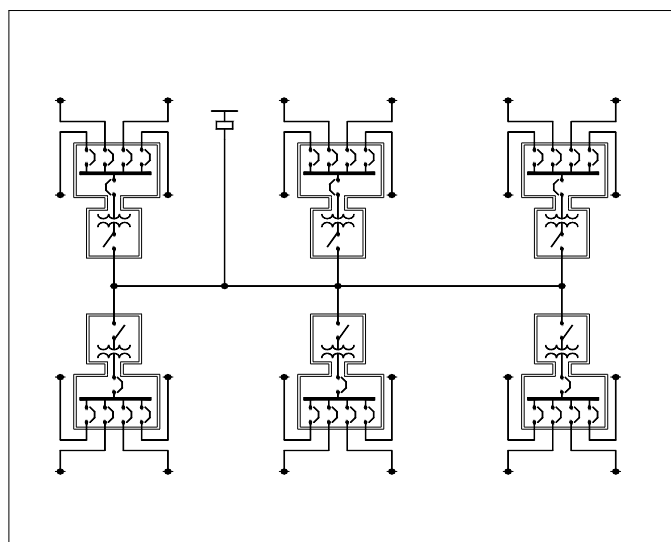


FIG. 02 - SISTEMA RADIAL SIMPLES MODERNO

Figura 1

Uma falta ocorrida no barramento de distribuição geral da subestação ou no próprio transformador provocará a interrupção generalizada de serviço, paralisando todas as cargas elétricas.

O funcionamento normal não poderá ser restabelecido até que sejam providenciados os reparos necessários. A ocorrência de uma falta em um alimentador em baixa tensão interromperá o serviço de todas as cargas supridas por esse alimentador.

Um arranjo modificado do sistema radial convencional (fig.2) consiste na distribuição de potência em tensão primária. A tensão é adequada ao nível de utilização nos próprios centros de carga da instalação através da utilização descentralizada de transformadores.

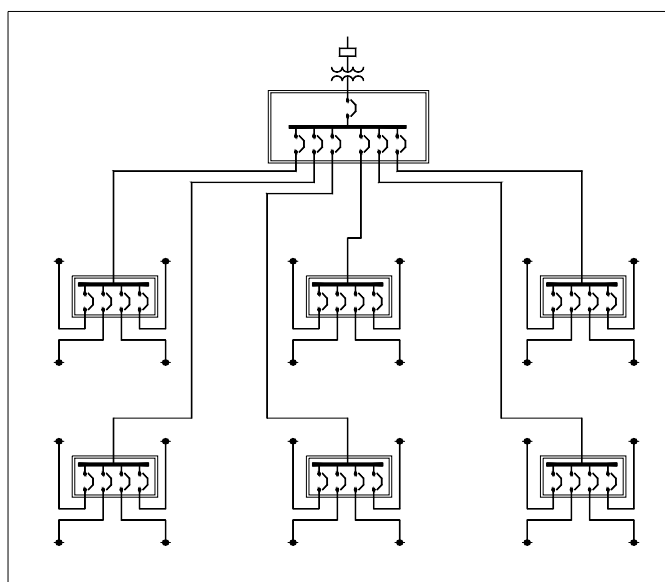


FIG. 01 - SISTEMA RADIAL SIMPLES CONVENCIONAL

Figura 2

Os transformadores são usualmente precedidos por dispositivos de proteção (fusíveis ou disjuntores) e chaves seccionadoras primárias, sendo conectados aos seus respectivos barramentos de baixa tensão através de dispositivos de seccionamento e proteção. Desde que cada unidade é instalada nas proximidades do local de serviço das cargas, cada qual deve possuir capacidade adequada para atender à demanda máxima de seu respectivo setor. Conseqüentemente, desde que exista qualquer diversidade de operação entre os vários centros de carga existentes, o sistema radial modificado (fig.2) sempre requer uma maior capacidade instalada em transformadores do que a capacidade requerida pela forma básica do sistema radial simples (fig.1).

Entretanto, devido à distribuição em tensão primária, perdas de energia são reduzidas, obtém-se melhor regulação de tensão, os custos dos alimentadores podem ser reduzidos (principalmente quando é possível utilizar-se a distribuição aérea com condutores de alumínio nú) e dispositivos de proteção de maiores capacidades são eliminados.

Este tipo de configuração do sistema radial simples requer, usualmente, menores investimentos iniciais se comparado a outros tipos de sistema de distribuição para instalações que possuam longos alimentadores e cuja demanda máxima global assuma valores da ordem de 1000 kVA ou mais. Entretanto, tal sistema mostra-se pobre com relação aos aspectos de continuidade de serviço e flexibilidade. Uma falta no alimentador primário pode vir a provocar a paralisação de todas as cargas e o serviço só pode ser normalizado quando houver a eliminação do problema. Na hipótese de ocorrência de uma falta em um transformador, o serviço poderá ser preservado para todas as cargas (desde que os dispositivos de proteção a ele associados estejam corretamente coordenados com a proteção geral da instalação como um todo), exceto para aquelas servidas pelo transformador em questão. Entretanto, deve-se ter em mente que, quando não são utilizados dispositivos de proteção individuais no primário de cada transformador (fusíveis de média tensão, por exemplo), esse tipo de sistema dificulta a localização de defeitos eventualmente ocorridos na rede interna de média tensão. É importante salientar que as proteções primárias podem ser utilizadas para facilitar a localização de defeitos e reduzir a parcela de cargas paralisadas quando da ocorrência de falta em um determinado transformador; porém, devem ser aplicadas com critério para que não seja prejudicada a coordenação (seletividade) com os relés de acionamento do disjuntor geral.

Aumentando-se o número de alimentadores primários é possível promover melhor flexibilidade e maior continuidade de serviço do sistema como um todo. Obviamente, este procedimento eleva os investimentos iniciais, mas minimiza a extensão das paralisações impostas por faltas ocorridas em um transformador ou alimentador.

Se cada transformador é alimentado por um circuito individual em média tensão (fig.3), o sistema se compara, sob o aspecto de continuidade de serviço, ao sistema radial simples convencional (fig.1). Este tipo de arranjo é, em geral, mais oneroso principalmente quando são utilizados disjuntores de média tensão para a

proteção de cada um dos alimentadores. Os custos podem ser reduzidos utilizando-se fusíveis de média tensão associados a chaves seccionadoras com abertura tripolar simultânea. Outra configuração possível, porém, tecnicamente menos implementada e desaconselhável em vários casos, seria a utilização apenas de chaves seccionadoras para cada circuito, precedidas pelo disjuntor geral da instalação. Nesta configuração, uma falta em um dos alimentadores de média tensão interrompe o serviço para todas as cargas elétricas. O serviço pode ser restabelecido para todas as cargas, exceto para aquelas associadas ao elemento faltoso do sistema, procedendo-se ao seccionamento do alimentador sob falta e ao fechamento do disjuntor geral. De qualquer forma, nesta situação pode tornar-se difícil a localização do ponto de defeito do sistema.

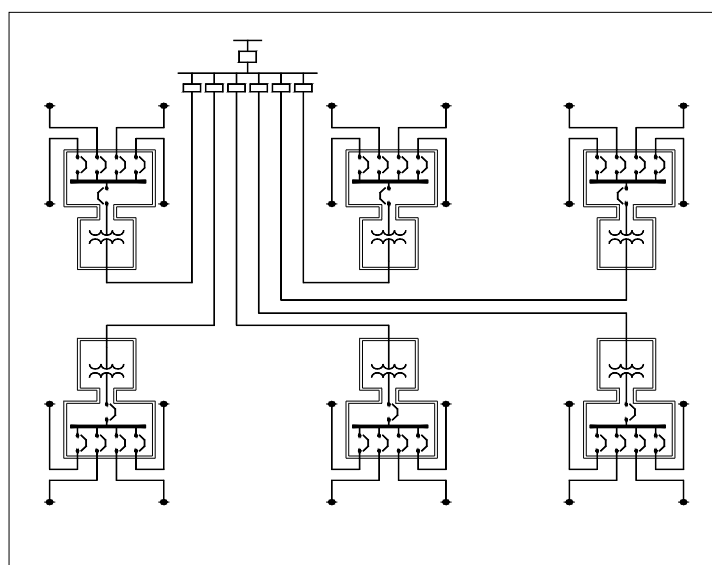


FIG. 03 - SISTEMA RADIAL SIMPLES MODERNO MODIFICADO

Figura 3

2 – Sistema Radial com Primário em Anel

Esse tipo de sistema (fig.4), possível com um menor investimento inicial, provê um rápido restabelecimento de serviço quando um alimentador primário ou um transformador são submetidos a uma falha. Um “loop” (ou anel) primário seccionalizável é protegido por um único disjuntor geral. Chaves seccionadoras de operação manual são instaladas no alimentador para fins de seccionamento e/ou transferência. Duas delas são instaladas onde o alimentador geral é submetido a derivações para a formação do anel e as demais, no primário dos transformadores. Isto torna possível desconectar da rede qualquer transformador e seu respectivo trecho associado ao anel primário. Dependendo do transformador ou trecho sob falta, determina-se as chaves que deverão ficar abertas e as que deverão ficar fechadas para que a maior quantidade possível de centros de carga permaneça em funcionamento.

O serviço pode então ser restabelecido, exceto para a fração desconectada do sistema, mediante o fechamento do dispositivo de proteção geral (que atua quando da ocorrência de uma falta em trecho do anel). Não há restabelecimento de serviço para o sub-sistema faltoso enquanto não forem tomadas as providências necessárias. Para maior facilidade de localização dos pontos de defeito podem ser utilizados fusíveis de média tensão (ou disjuntores) entre o primário dos transformadores e suas respectivas chaves seccionadoras. Neste caso deve-se proceder a uma análise criteriosa das condições de coordenação com os relés de acionamento do disjuntor geral perante condições de curto-circuito.

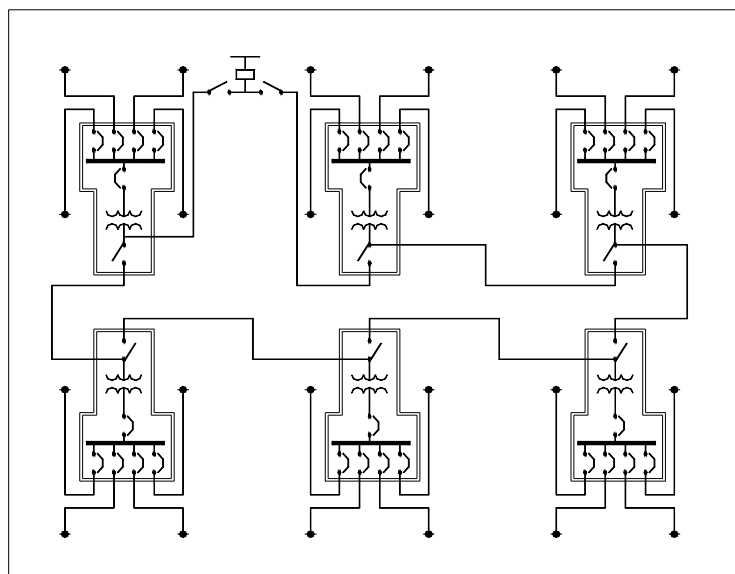


FIG. 04 - SISTEMA RADIAL COM PRIMÁRIO EM ANEL

Figura 4

Os custos do sistema apresentado na fig.4 são ligeiramente superiores aos custos normalmente verificados para o sistema da fig.2. Considerada a mesma instalação, o custo dos cabos primários tende a ser superior e há dois dispositivos de seccionamento a mais no sistema.

3 – Sistema Radial com Secundários Interligados (e Anel Primário)

Esse sistema permite um rápido restabelecimento de serviço para todas as cargas após uma falta no alimentador primário ou em um transformador. É utilizado um “loop” secundário para prover uma alimentação de emergência quando uma falta ocorre em um determinado transformador ou em um trecho do anel primário (fig.5). O arranjo do circuito primário é o mesmo utilizado no sistema radial com primário em anel; entretanto, a configuração do primário apresentada na fig.3 também pode ser adotada obtendo-se praticamente os mesmos resultados, porém, com custos mais elevados.

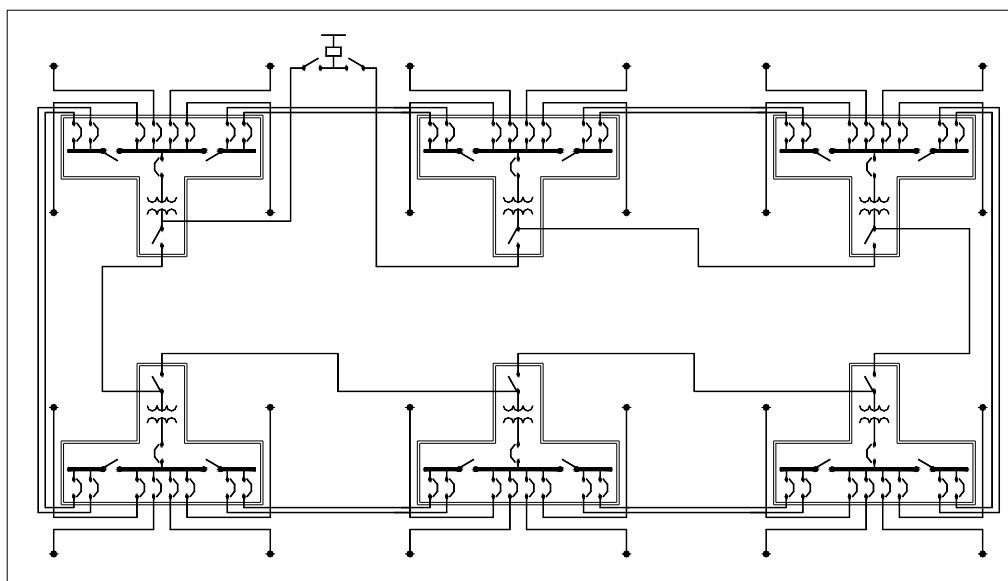


FIG. 05 - SISTEMA RADIAL COM SECUNDÁRIOS INTERLIGADOS

Figura 5

Uma falta em um trecho do alimentador primário ou em um trafo provoca a atuação do disjuntor geral e paralisa todas as cargas. O serviço pode ser restabelecido pela abertura de duas chaves seccionadoras, pela abertura do disjuntor do secundário do transformador faltoso (ou próximo ao ponto de falta) e pelo fechamento do disjuntor geral da instalação. Quando o alimentador primário é reenergizado, todas as cargas podem novamente entrar em serviço. As cargas originalmente alimentadas pelo barramento associado ao transformador desconectado são supridas pela interligação dos secundários a partir dos barramentos de carga mais próximos.

As interligações secundárias fornecem vantagens adicionais além do suprimento de emergência para o restabelecimento de serviço. Elas ajudam na equalização operacional de todos os transformadores e desta forma tornam desnecessárias, dependendo das condições, as equiparações das capacidades de cada um dos transformadores à carga ligada a cada barramento – é importante notar que o balanceamento da capacidade de transformadores e cargas pode ser um real problema em todos os outros tipos de sistema radial exceto no sistema radial convencional (fig.1). As interligações secundárias permitem que cada kVA disponível nos transformadores seja utilizado por todo o sistema, tornando-se possível a obtenção das vantagens do fator de diversidade entre as cargas já que os transformadores são conectados em paralelo.

Como resultado, há usualmente uma redução da potência necessária em transformadores, acima daquela obtida em qualquer outro sistema radial exceto no sistema radial convencional (fig.1). Esse sistema é também melhor adaptável à partida de grandes motores já que as correntes de partida são supridas através de vários transformadores em paralelo. Desta forma, quando se consideram os

efeitos da partida de motores de maior porte, o uso desse sistema pode resultar em economia nos custos de dispositivos de partida (devido às menores quedas de tensão no sistema). Sendo assim, é o sistema operacionalmente mais satisfatório para circuitos secundários combinados de força e iluminação.

No sistema secundário-interligado a corrente de falta flui não somente pelo transformador associado ao barramento ou circuito sob falta, mas também através de outros transformadores e através das interligações secundárias. O incremento resultante na corrente de falta pode requerer a utilização de dispositivos de proteção terminal com uma capacidade de interrupção superior àquela necessária em outros tipos de sistemas radiais. A elevação dos custos de tais dispositivos pode ser ou não coberta pela economia advinda da redução da capacidade instalada em transformadores e condutores secundários.

A priori, é difícil fechar questão com relação à comparação de custos entre o sistema com secundários interligados e o sistema radial com primário em anel. Em algumas instalações o custo adicional das interligações será compensado pela economia decorrente da redução da capacidade em transformadores. Em outros casos, devido à ausência de diversidade e à distribuição uniforme de cargas, tais economias são muito reduzidas (ou podem não existir), e o sistema com primário em anel sem interligações secundárias tende a tornar-se mais atrativo. Entretanto, as vantagens do rápido restabelecimento de serviço para todas as cargas, maior eficiência, maior flexibilidade e melhores condições de tensão podem vir a justificar os custos adicionais decorrentes da utilização das interligações secundárias.

4- Sistema Radial com Primário-Seletivo

Este sistema difere dos demais anteriormente descritos pelo fato de prover, no mínimo, dois circuitos alimentadores primários para cada centro de cargas. Ele é concebido de forma que quando um circuito primário está fora de serviço, o alimentador (ou alimentadores restantes) tem capacidade suficiente para alimentar a carga total. Ainda que três ou mais alimentadores primários possam ser utilizados, usualmente apenas dois são previstos. Metade dos trafos são normalmente conectados a cada um dos dois alimentadores (fig.6).

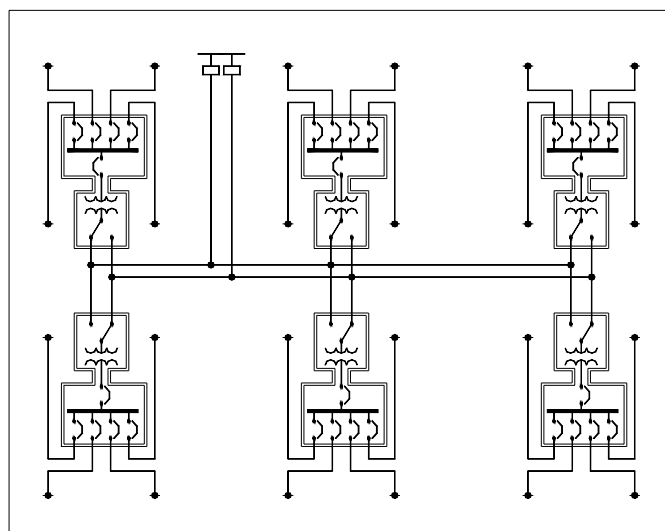


FIG. 06 - SISTEMA RADIAL COM PRIMÁRIO-SELETIVO

Figura 6

Quando uma falta ocorre em um dos alimentadores primários somente metade dos transformadores da instalação é desenergizada. Chaves primárias (comutadoras) são usadas em todos os transformadores de forma que, na quando da eventual ocorrência de uma falta em um dos alimentadores, possa haver o chaveamento para o outro alimentador e o conseqüente restabelecimento de serviço para todas as cargas.

Um curto-circuito imposto sobre os dispositivos de proteção terminal possui magnitude inferior à ocorrida no sistema com secundários interligados e tem aproximadamente a mesma ordem de grandeza verificada para os outros tipos de sistema que utilizam transformadores instalados diretamente nos centros de carga.

Se uma falta ocorre em um transformador, o disjuntor do alimentador primário a ele associado atua e interrompe o serviço para metade das cargas da instalação (o mesmo ocorre para faltas nos alimentadores primários). O transformador submetido à falta é desconectado do sistema mediante a transferência de sua chave comutadora primária para a posição “aberta”. O serviço é então restabelecido para todas as cargas, exceto para aquelas normalmente alimentadas pelo transformador defeituoso, através do fechamento do disjuntor geral em média tensão. As cargas desativadas só entram em funcionamento após sanado o defeito.

O custo do sistema radial com primário seletivo é maior que o do sistema radial simples devido ao disjuntor adicional do segundo alimentador primário, ao uso de chaves comutadoras no primário de cada transformador e devido à maior quantidade de cabos utilizados no primário. Todavia, os benefícios advindos da menor quantidade de cargas desativadas após a ocorrência de faltas em um alimentador podem compensar os maiores custos iniciais.

O sistema radial primário-seletivo, entretanto, não apresenta a mesma performance do sistema com secundários interligados do ponto de vista de restabelecimento de serviço após uma falta. Nesse aspecto ele é somente ligeiramente melhor que o sistema radial com primário em anel. Em alguns casos, particularmente em instalações de porte razoável, com leve ou média densidade de cargas, aproximadamente a mesma qualidade de serviço pode ser obtida com menores custos utilizando o sistema radial com primário em anel dispondo de dois “loops” separados ao invés de um. Neste caso, metade dos transformadores são conectados a cada “loop” do sistema.

5 – Sistema Radial com Secundário-Seletivo

Este sistema utiliza o mesmo princípio de alimentadores duplicados a partir da fonte de potência, como ocorre no sistema radial com primário seletivo. Entretanto, a duplicação se faz também ao longo de cada barramento de carga no lado secundário dos transformadores. Tal arranjo possibilita um rápido restabelecimento de serviço para todas as cargas quando uma falta ocorre em um alimentador primário ou transformador, como no sistema radial com secundários interligados.

Uma forma usual do sistema radial com secundário-seletivo é indicada na fig.7. Cada centro de cargas da instalação é suprido por dois alimentadores primários através de dois transformadores.

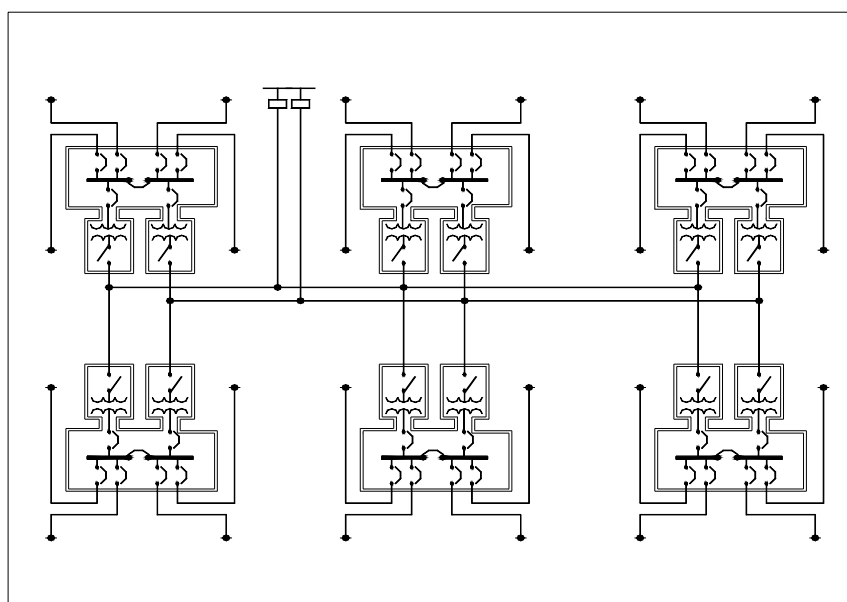


FIG. 07 - SISTEMA RADIAL COM SECUNDÁRIO-SELETIVO

Figura 7

A capacidade de cada um dos transformadores deve ser tal que se possa alimentar seguramente toda a carga suprida por ambos os transformadores. Cada transformador é conectado a uma seção do barramento de baixa tensão do centro de cargas (à qual está ligada a metade das cargas) através de um dispositivo de

proteção. Um disjuntor de interligação (usualmente denominado “tie-breaker”) é utilizado para conectar as duas seções do barramento secundário de cada centro de cargas. Normalmente o disjuntor de interligação permanece aberto e o sistema opera como dois sistemas independentes. O disjuntor de interligação é intertravado com os dois disjuntores gerais dos secundários dos transformadores de forma que não possa ser fechado a menos que um dos disjuntores principais esteja aberto. Este procedimento visa minimizar os esforços de interrupção impostos aos disjuntores dos circuitos terminais quando da ocorrência de uma falta.

Uma falta em um circuito alimentador primário causa a paralisação de metade dos transformadores da instalação, como ocorre no sistema radial com primário seletivo. O serviço pode ser restabelecido mediante a abertura dos disjuntores secundários associados ao alimentador sob falta e ao fechamento de todos os disjuntores de interligação. Quando isto é feito, toda a carga é alimentada pelo outro alimentador primário e pela metade dos transformadores da instalação. Sendo assim, ambos os alimentadores primários devem ser capazes de alimentar toda a carga como no sistema primário seletivo e uma maior capacidade em transformadores é requerida.

Uma falta em um transformador provoca a atuação do disjuntor geral em média tensão associado ao alimentador primário correspondente e interrompe o serviço da metade dos transformadores. O restabelecimento pode ser obtido pela abertura da chave primária e do disjuntor secundário do transformador em questão, fechando-se em seguida o disjuntor de interligação daquele centro de cargas e o disjuntor do alimentador primário. Esses procedimentos de chaveamento manual estabelecem as condições de operação normal do sistema sendo que o transformador defeituoso é totalmente desconectado e sua carga é suprida através do transformador adjacente.

O custo do sistema radial com secundário seletivo é, via de regra, consideravelmente mais elevado que os custos dos sistemas radiais anteriormente discutidos, podendo haver exceções como, por exemplo, o sistema radial convencional (fig.1), que utiliza uma subestação central e alimentadores em baixa tensão, e o sistema com secundários interligados (fig.3). Isto se deve principalmente à elevada capacidade total em transformadores requerida para prover fornecimento duplicado de potência para os barramentos de carga secundários. Devido à capacidade de reserva dos transformadores, a regulação de tensão no sistema secundário-seletivo sob condições normais é melhor que a verificada nos demais sistemas abordados, com a possível exceção do sistema radial com secundários interligados. Do ponto de vista de flutuações de tensão, quando uma carga como um motor de maior porte é ligada ao sistema, este não se comporta tão bem como o sistema com secundários interligados. A vantagem que o secundário-seletivo oferece com relação ao secundário interligado consiste na menor magnitude de desativação das cargas quando da ocorrência de faltas. Por outro lado, o sistema com secundários interligados apresenta maior flexibilidade e pode ser mais facilmente adaptado às condições de alteração das cargas.

Uma configuração modificada do secundário-seletivo, freqüentemente menos onerosa que a configuração comum, é apresentada na fig.8. Nesse sistema há somente um transformador em cada centro de cargas, ao invés de dois. Pares de barramentos de carga adjacentes são conectados através de condutores secundários (ou barramentos) e desta forma permite-se a transferência de carga para qualquer um deles quando ocorre uma falta em um transformador ou alimentador primário. Cada circuito de interligação é conectado a seus dois barramentos de carga através de disjuntores secundários de acoplamento. Cada disjuntor de acoplamento é intertravado de forma que não possa haver fechamento a menos que um dos dois disjuntores dos secundários dos transformadores esteja aberto.

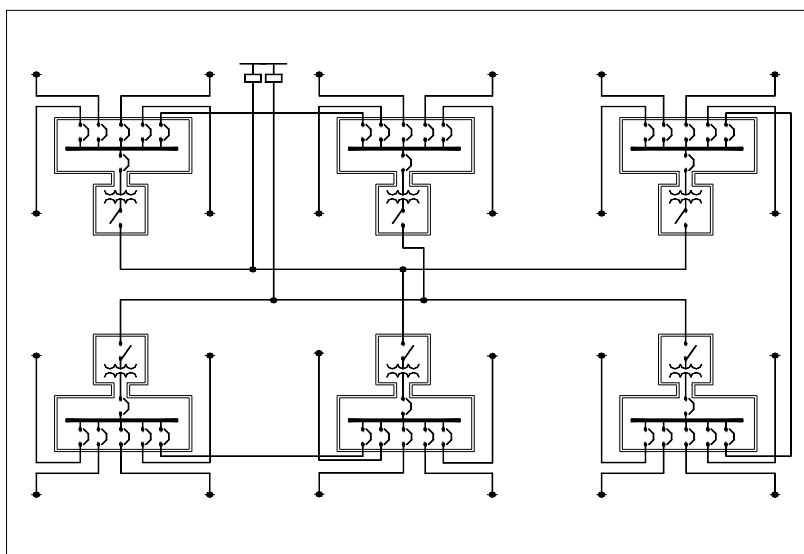


FIG. 08 - SISTEMA RADIAL COM SECUNDÁRIO-SELETIVO MODIFICADO

Figura 8

6 – Sistema Reticulado Simples

O sistema secundário reticulado é o sistema que tem sido utilizado há algumas décadas para a distribuição de energia elétrica nas áreas centrais de alta densidade de carga nas cidades (muito comumente em distribuição subterrânea). Modificações neste tipo de sistema o tornam aplicável à distribuição de energia em instalações internas (fig.9).

A mais conhecida vantagem do sistema secundário reticulado é a continuidade de serviço. Nenhuma falta em qualquer ponto do sistema irá interromper o serviço para mais do que uma pequena parcela das cargas. A maioria das faltas será automaticamente sanada sem a interrupção do serviço de qualquer carga.

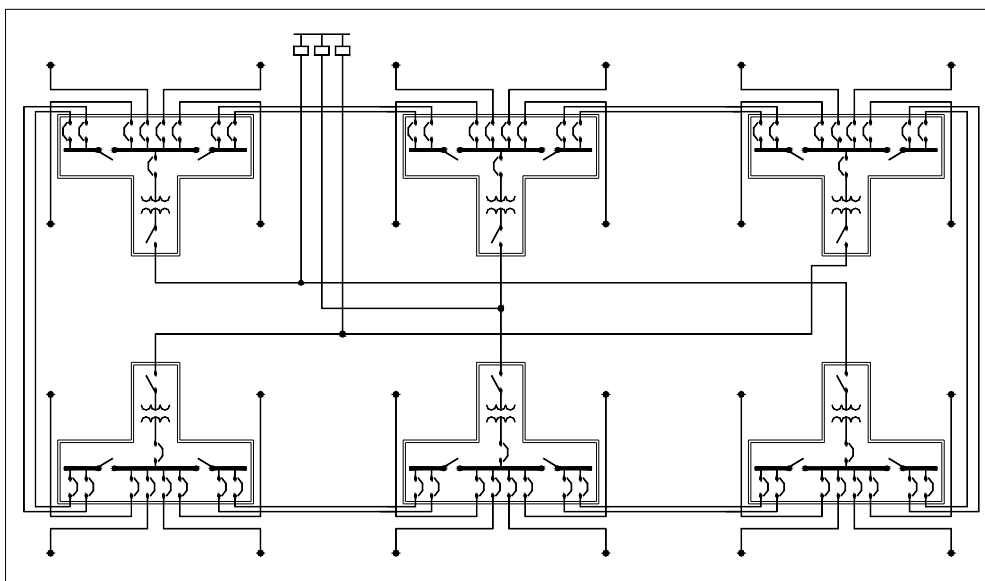


FIG. 09 - SISTEMA RETICULADO SIMPLES

Figura 9

Uma outra vantagem notável que o sistema reticulado oferece é a flexibilidade oferecida com os mínimos custos e com um mínimo de interrupção de serviço para as cargas em operação, principalmente quando ocorrem mudanças ou acréscimo de cargas. Adicionalmente à flexibilidade e à continuidade de serviço, o sistema secundário reticulado provê uma regulação de tensão bastante boa e excepcionalmente uniforme além de uma alta eficiência, fato que reduz os custos com energia devido à redução de perdas.

Três diferenças fundamentais entre o sistema reticulado e o sistema radial simples revelam notáveis vantagens para o reticulado. Primeiramente, um *protetor de rede* é instalado no circuito secundário de cada transformador do sistema em lugar do usual disjuntor. Em segundo lugar, os secundários de todos os transformadores são conectados entre si através de um barramento em anel ou “loop” secundário à partir do qual as cargas são supridas utilizando-se circuitos radiais de comprimentos reduzidos. Em terceiro lugar o suprimento primário tem capacidade suficiente para alimentar toda a carga da instalação, sem estar submetido a sobrecargas, quando qualquer um dos alimentadores primários estiver fora de serviço.

Em linhas gerais, um *protetor de rede (ou do reticulado)* pode ser definido como um dispositivo especial com a finalidade de proteção / manobra, com fechamento motorizado, “trip” a partir de fonte independente e controlado por relés de rede. Os relés do reticulado operam para o fechamento automático do protetor apenas quando as condições de tensão são tais que o transformador a ele associado supre potência às cargas do “loop” secundário, e para a abertura automática do protetor quando a potência flui em sentido inverso, ou seja, do “loop” secundário para o transformador. O propósito do protetor de rede é proteger o “loop” secundário e as cargas por ele supridas contra faltas no transformador e no

alimentador primário através da desconexão do transformador quando ocorre um retorno de alimentação.

O principal propósito do “loop” secundário é prover uma fonte de alimentação alternativa para qualquer barramento de carga quando o alimentador primário que o supre é desenergizado; desta forma, o sistema é concebido de forma a se evitar qualquer interrupção de serviço quando uma falta ocorre em um transformador ou alimentador. A utilização do “loop”, entretanto, apresenta pelo menos quatro outras vantagens importantes. A primeira delas é a economia em capacidade de transformação. Ele permite que transformadores sub-carregados auxiliem aqueles submetidos a um maior carregamento e, desta forma, a carga em todos os transformadores tende a equalizar-se. Em segundo lugar, ele possibilita economia em condutores secundários e em eletrodutos já que torna-se desnecessário suprir cada centro de cargas com uma capacidade de transformação correspondente apenas à carga daquele ponto. As cargas podem ser supridas a partir de barramentos de alimentação alocados entre os trafos do reticulado. Isto permite a utilização de circuitos radiais mais curtos e resulta em uma considerável economia na cablagem secundária e em eletrodutos, comparando-se com os circuitos de carga em um sistema radial simples. Em terceiro lugar, o uso do “loop” propicia menores perdas e provê melhores condições de tensão. A regulação de tensão de um sistema reticulado permite que cargas de iluminação e força motriz sejam alimentadas, sem problemas, pelo mesmo barramento. Motores de maior potência podem partir diretamente à linha de forma bem mais satisfatória que nos sistemas radiais. Este fato resulta freqüentemente na possibilidade de simplificação do acionamento dos motores, permitindo o uso de motores de baixa tensão com potências nominais mais elevadas partindo com dispositivos menos onerosos. A quarta vantagem importante consiste na flexibilidade que o sistema proporciona. Novas cargas (ou cargas realocadas) podem ser supridas diretamente à partir do barramento de carga mais próximo sem que seja necessário distribuir outras cargas buscando manter adequada a capacidade do transformador ao qual a carga será acrescentada. Centros de carga em rede ou barramentos de carga podem ser realocados ou novas unidades podem ser adicionadas ao “loop” variando-se apenas as condições de carregamento. A capacidade do “loop” não requer alteração quando centros de carga adicionais são conectados a ele se cada novo transformador possui potência nominal não superior àqueles originalmente utilizados. O “loop” permite que alterações sejam feitas sem que o serviço seja interrompido para as cargas existentes. Esta maior flexibilidade do sistema reticulado permite alterações mais fáceis, mais rápidas e com menores custos comparativamente ao sistema radial.

Desde que o comprimento do “loop” secundário (que, na essência, é um “barramento estendido”) é consideravelmente maior que o dos barramentos utilizados nos sistemas radiais usuais, a probabilidade da ocorrência de faltas em sua extensão é teoricamente considerável. Desta forma, torna-se necessário proteger o sistema contra faltas nesse barramento de maneira que uma falta eventual seja automaticamente isolada sem interrupção de serviço. Para que isto possa ser garantido, o “loop” secundário deve consistir de, no mínimo, dois circuitos trifásicos. Esses circuitos separados devem ser conectados aos

barramentos em cada ponto onde os circuitos de cargas radiais sejam servidos pelo “loop”. Cada “loop” individual deve ser conectado aos barramentos através de dispositivos de proteção limitadores de corrente.

Um dispositivo de proteção do tipo “limitador” (um fusível ou um disjuntor, por exemplo) tem a função básica de desconectar automaticamente um trecho condutor sob falta em um sistema de distribuição e proteger as seções não faltosas contra sérios danos térmicos, o que é obtido a partir da limitação da tendência de elevação das correntes de falta. Em geral, os níveis de corrente de limitação desses dispositivos situam-se (ou são ajustados) em cerca de 3 vezes o valor da capacidade de condução permanente do condutor por ele protegido, o que torna-se necessário quando se avalia a seletividade com os demais limitadores existentes no “loop” secundário. É importante atentar para o fato de que se tais limitadores forem sensibilizados para atuação sob valores mais baixos de corrente, as unidades instaladas nos trechos “bons” e nos trechos sob falta tenderão a operar na menor fração de tempo definida em suas curvas tempo-corrente para faltas que gerem altas correntes. Para essa situação hipotética verifica-se que, não somente os limitadores do condutor faltoso mas uma série de outros (em condutores “bons”), teriam a chance de atuar quase que instantaneamente e provocar, em vários casos, interrupções de serviço desnecessárias. Os altos valores de corrente de fusão dos limitadores também favorecem a manutenção de temperaturas normais em seus terminais de forma que os condutores a eles associados possam conduzir seguramente sua corrente nominal.

Se as cargas devem ser supridas à partir do “loop” secundário em pontos diferentes daqueles aos quais os transformadores do reticulado estão conectados, a corrente nominal do “loop” deve ser igual à corrente de plena carga de um dos transformadores que suprem o “loop”. A corrente nominal do “loop” pode ser seguramente reduzida para $2/3$ do valor acima citado se as cargas são supridas pelo “loop” somente a partir do ponto de instalação dos transformadores. Se é utilizada uma potência superior à potência nominal de um transformador do reticulado, a corrente nominal do “loop” deve se basear na corrente nominal do maior transformador conectado ao “loop”. Quando as cargas são servidas a partir do “loop”, em pontos diferentes do local de instalação dos transformadores, a máxima carga que deve ser suprida entre quaisquer dois transformadores adjacentes não deve exceder à potência nominal do maior entre esses dois transformadores.

Em geral, para que seja obtida uma seletividade satisfatória entre limitadores sob todas as condições de falta, um mínimo de 2 cabos por fase deve ser utilizado no “loop” secundário. A bitola e o número de condutores usado em qualquer caso devem ser selecionados para incorrer nos mais baixos custos de instalação. Entretanto, para uma boa compatibilização com os limitadores mais comumente disponíveis no mercado, selecionam-se condutores com seção nominal não superior a 300mm^2 .

Usualmente, os circuitos de carga são seccionados dos barramentos de carga através de disjuntores. Os disjuntores devem prover proteção adequada contra sobrecargas aos seus circuitos associados e ser capazes de interromper a corrente de falta presumida naquele ponto do sistema. O esforço de interrupção médio nos disjuntores terminais em um sistema reticulado será freqüentemente mais elevado que o esforço no sistema radial, para a mesma capacidade em transformadores.

Apesar da capacidade ociosa requerida nos alimentadores primários, isto poderá resultar em uma economia em condutores e dispositivos quando os custos são comparados com os obtidos no sistema radial. Essa economia se deve ao fato de que, em muitos sistemas radiais, freqüentemente são utilizados alimentadores de menor bitola, porém, em maior número para garantir a redução das paralisações quando uma falta ocorre em um alimentador primário.

Na hipótese da ocorrência de uma falta em um alimentador primário ou transformador em um sistema reticulado, o ponto sob defeito é isolado do sistema pela atuação automática do disjuntor do alimentador primário e de todos os protetores de rede associados àquele alimentador. Esta operação não interrompe o serviço de qualquer carga. Quando os reparos necessários são providenciados, o sistema retorna às condições de operação normal pelo fechamento do disjuntor do alimentador primário. Todos os protetores do reticulado associados ao alimentador se fecham automaticamente.

O sistema reticulado simples assume, às vezes, a configuração comumente conhecida como reticulado concentrado.

Com este sistema, a capacidade emergencial para prevenir a interrupção de serviço quando uma falta ocorre em um alimentador ou transformador é provida através de condutores e transformadores com uma determinada capacidade de reserva, ao invés de se interligarem os centros de carga por um “loop” secundário como no sistema reticulado simples usual.

O sistema de distribuição reticulado simples concentrado se assemelha ao sistema radial com secundário seletivo pelo fato de que em cada centro de cargas o suprimento se faz através de dois ou mais alimentadores primários utilizando-se dois ou mais transformadores. Nesse sistema, entretanto, os trafos são conectados através de protetores de rede a um barramento de carga único (fig.10).

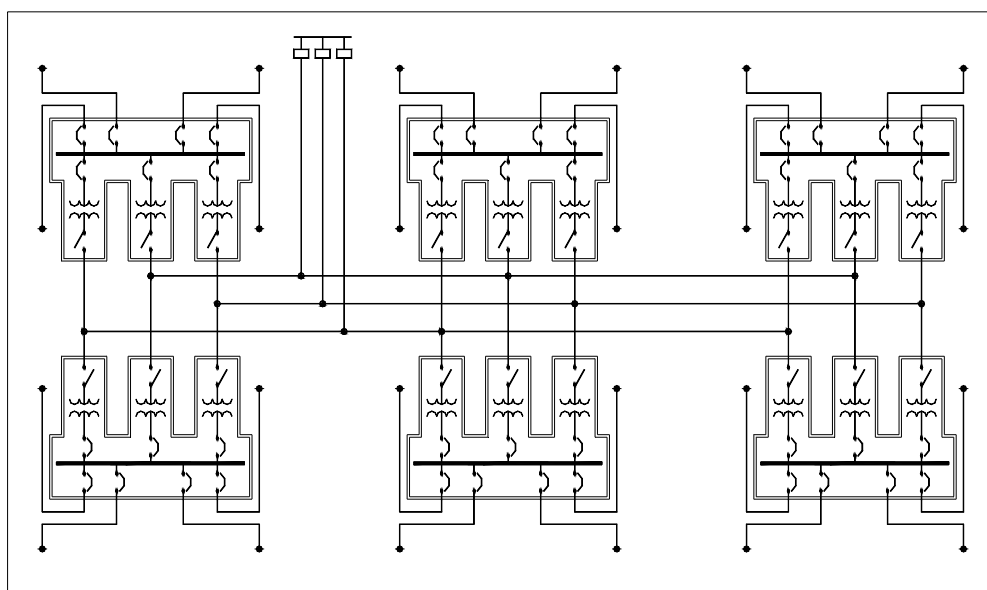


FIG. 10 - SISTEMA RETICULADO SIMPLES CONDENSADO (OU COMPACTO)

Figura 10

Desde que os trafos de cada área operam em paralelo, uma falta em um alimentador primário ou transformador não provoca qualquer interrupção de serviço. Os transformadores de cada centro de cargas normalmente serão igualmente carregados ao passo que a equalização de carregamento de dois transformadores suprindo um centro de cargas no sistema radial com secundário seletivo é de difícil obtenção. Os esforços de interrupção impostos aos disjuntores dos circuitos terminais serão maiores nesse sistema do que no secundário seletivo.

Os sistemas de distribuição reticulados simples concentrados são mais econômicos que as outras formas de reticulado em instalações com altas densidades de carga localizadas em áreas reduzidas, com consideráveis distâncias entre cada concentração (centros de carga) e com poucas cargas entre elas.

A principal desvantagem deste sistema consiste no fato de que ele não é tão flexível com relação ao acréscimo e deslocamento físico de cargas como são as outras formas de sistema reticulado. Ele é utilizado quando um alto grau de continuidade de serviço é requerido, quando a flexibilidade é um fator de menor importância e quando se necessita da otimização dos custos (em geral inferiores aos verificados com a utilização de “loops” secundários). Com relação aos custos, em geral tal sistema apresenta-se mais econômico quando três ou mais alimentadores primários são requeridos. Isto se deve ao fato de que, suprindo cada barramento através de três ou mais transformadores, reduz-se bastante a ociosidade dos cabos e a capacidade individual requerida em transformação.

7 – Sistema Reticulado com Primário-Seletivo

Esse é um sistema de distribuição secundário reticulado geralmente aplicável e amplamente utilizado para estabelecimentos industriais que necessitem de boa confiabilidade e estabilidade operacional. Em princípio ele é similar ao sistema reticulado simples, oferecendo quase todas as suas vantagens e apresentando os menores custos (em se tratando de reticulado) para instalações ou centros de carga que requeiram somente dois ou três alimentadores primários.

O sistema é concebido utilizando-se o princípio de alimentação duplicada ou alternada para cada transformador (fig.11), como no sistema radial com primário seletivo.³

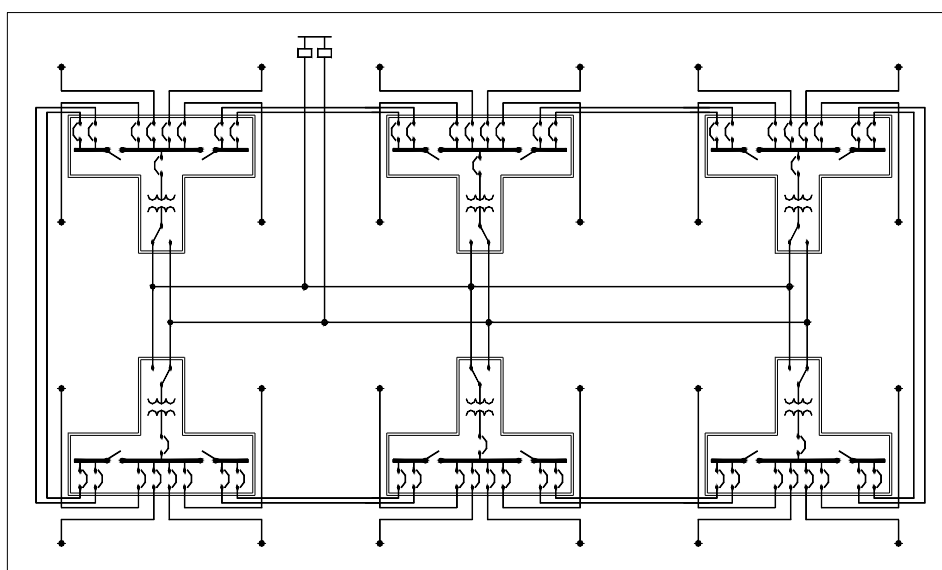


FIG. 11 - SISTEMA RETICULADO COM PRIMÁRIO - SELETIVO

Figura 11

Esse procedimento praticamente elimina a necessidade de capacidade de reserva em transformadores e reduz os esforços de interrupção impostos sobre os disjuntores terminais, mas não reduz a capacidade de reserva requerida no alimentador primário.

Cada transformador no sistema reticulado com primário-seletivo é equipado com uma chave comutadora primária. Dois alimentadores primários são conduzidos a cada transformador. Em uma instalação que requeira dois alimentadores primários cada qual deve ser capaz de suprir toda a carga da instalação. Cada transformador é conectado a um barramento de cargas através de um protetor de rede e os circuitos radiais de alimentação das cargas são conectados ao barramento através de disjuntores (ou chaves seccionadoras com fusíveis).

Um “loop” secundário, como o utilizado no sistema radial com secundários interligados e também no sistema reticulado simples, conecta cada barramento de carga a dois barramentos de carga adjacentes.

Normalmente, metade dos transformadores do reticulado são conectados a cada alimentador primário. Uma falta em um alimentador primário provoca a desconexão do alimentador faltoso e de seus transformadores devido à operação automática do disjuntor primário e dos protetores do reticulado envolvidos. Toda a carga da instalação é então suprida através do alimentador primário restante e pela metade dos transformadores da instalação. Os transformadores associados ao alimentador sob falta podem ser conectados ao alimentador em serviço pela operação manual de suas chaves comutadoras. Isto alivia as possíveis sobrecargas nos transformadores normalmente associados ao alimentador não defeituoso.

Uma falta em um alimentador é isolada do sistema através da operação do disjuntor primário e dos protetores de rede associados ao alimentador correspondente.

O transformador defeituoso pode ser desconectado do alimentador primário pela abertura de sua chave comutadora primária. O alimentador e seus transformadores sem defeito podem ser imediatamente colocados em serviço. Uma falta em um alimentador primário ou transformador não causará nenhuma interrupção de serviço para as cargas da instalação.

O custo do sistema reticulado com primário-seletivo pode ser comparado com o do sistema radial com secundário-seletivo. Em instalações nas quais as cargas não são uniformes e há diversidade apreciável entre os centros de carga, o sistema reticulado com primário-seletivo normalmente terá menores custos iniciais que os custos verificados no sistema radial com secundário-seletivo.

É comum a prática de suprir os circuitos radiais somente à partir dos barramentos de carga aos quais os transformadores do reticulado estão conectados. Uma redução nos custos desse sistema pode ser obtida pela alimentação das cargas à partir do "loop", em pontos entre os barramentos de carga. Quando isto é feito, a cablagem do "loop" deve ser preferencialmente paralela e as cargas alimentadas à partir de barramentos de derivação. Conectando cargas ao "loop" secundário desta maneira, reduz-se o comprimento médio dos circuitos de carga secundários, ou seja, derivando todas as alimentações terminais do "loop" secundário a partir do ponto mais próximo, a quantidade de condutores para circuitos secundários pode ser reduzida ao mínimo.

Contudo, isto não pode ser feito de forma prática quando se usa apenas um cabo por fase para o "loop" secundário e se dispositivos limitadores estão instalados nos condutores do "loop" a cada ponto de derivação para as cargas. O sistema torna-se prático, entretanto, se dois ou mais circuitos paralelos por fase são conduzidos através de barramentos tipo "plug-in" ao longo do "loop" secundário. Nessa configuração, os transformadores são conectados aos barramentos principais através dos protetores de reticulado e nem todos os disjuntores terminais (ou nenhum deles) estarão instalados nesse local e sim, ao longo do "loop" de acordo com o posicionamento físico das cargas. Todas as cargas são supridas a partir de chaves sob-carga ou disjuntores de interligação dos

barramentos de derivação ao “loop” secundário; este, por sua vez, interliga, através dos limitadores, cada barramento principal.

Essa forma de sistema reticulado requer condutores de maior bitola no “loop” secundário comparativamente aos outros sistemas previamente descritos. Ela também gera alguns problemas no que tange à continuidade de serviço já que uma falta em uma seção do barramento irá causar a paralisação das cargas servidas por aquela seção.

Da mesma forma que no sistema reticulado simples, o reticulado com primário seletivo pode também ser configurado como um sistema reticulado concentrado com primário seletivo. Nesse caso, cada transformador é equipado com uma chave comutadora primária com conexão possível aos dois alimentadores primários (fig.12).

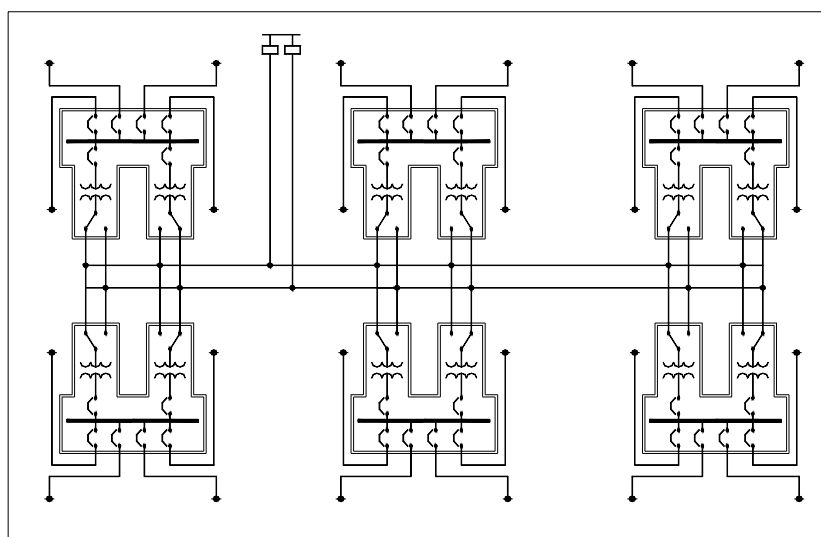


FIG. 12 - SISTEMA RETICULADO CONDENSADO COM PRIMÁRIO - SELETIVO

Figura 12

Isso elimina a necessidade de previsão de uma capacidade de reserva em transformadores. Falhas no alimentador primário e em um transformador são sanadas sem qualquer interrupção de serviço para as cargas. Quando um alimentador primário é desenergizado devido a uma falta, é possível que os transformadores associados ao segundo alimentador venham a fornecer temporariamente, dependendo de seu dimensionamento, potências superiores às suas potências nominais até que os trafos associados ao alimentador sob defeito sejam chaveados pela operação das chaves comutadoras primárias. Após a conclusão das operações de chaveamento (procedimento operacional que nessa situação deve ser realizado de maneira ágil), todas as sobrecargas do sistema são aliviadas.

Quando o sistema é utilizado nessa configuração, uma falha em um transformador requer uma redução da carga alimentada por seu barramento para que sejam evitadas sobrecargas sérias sobre o transformador que permanece conectado a

esse ponto. Entretanto, uma falha em um transformador em boas condições de operação ocorrerá tão infrequentemente que os custos prevendo-se uma capacidade de reserva para os transformadores em todos os pontos do sistema podem não se justificar para eliminar a remota possibilidade da necessidade de redução de carga em um barramento. Se a necessidade de redução de carga for provável, possivelmente será menos oneroso utilizar o sistema reticulado simples concentrado do que prover a necessária capacidade de reserva em transformadores no sistema reticulado com primário-seletivo. O sistema reticulado concentrado com primário-seletivo normalmente custará menos que o sistema reticulado concentrado convencional se dois alimentadores primários e dois transformadores por centro de cargas são utilizados. Se três ou mais alimentadores são requeridos, provavelmente o panorama de custos prováveis entre os dois sistemas se inverterá.

Bibliografia:

- Westinghouse Architect's And Engineers' Electrical Data Book
- American Electricians' Handbook – Terrel Croft / Wilford Summers
- Instalações Elétricas – Ademaro A.M.B. Cotrim
- Projetos, Estudos e Notas do Autor