

Perdas energéticas em GTD

Um dos grandes desafios para o setor elétrico é a redução das perdas energéticas em geração, transmissão e distribuição, pois elas impactam não somente os consumidores, como toda a cadeia responsável pelo fornecimento de energia no país. A partir desta edição, teremos como mentor deste fascículo o engenheiro eletricista e professor adjunto da Universidade Federal do ABC, Joel David Melo Trujillo, que possui mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.



Capítulo 6

Perdas técnicas e não técnicas em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica - Parte 2/2

Por Haroldo de Faria Junior* e Edmarcio Antonio Belati*

1 - INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta a segunda parte da análise do tema de perdas elétricas nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica para a Revista O Setor Elétrico. Nesta parte, é feita uma apresentação dos métodos e procedimentos disponíveis atualmente para a redução das perdas elétricas em sistemas de potência. Apresentam-se exemplos de redução de perdas técnicas em um sistema de distribuição através de uma simulação computacional, destacando-se os resultados obtidos.

A eficiência na distribuição de energia elétrica é um fator crítico para garantir a sustentabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico. As perdas técnicas na transmissão e na distribuição de energia são inerentes ao processo, resultando em desperdício de energia e aumento dos custos operacionais. Para mitigar essas perdas, diversas técnicas podem ser implementadas, cada uma com abordagens específicas e benefícios distintos. Este artigo apresenta uma análise de algumas formas de redução de perdas técnicas na distribuição, utilizando uma rede de distribuição de 33 barras como exemplo prático.

Os sistemas de distribuição operam de forma radial principalmente devido à sua simplicidade e custo mais baixo de construção e manutenção. A facilidade de manutenção é outra vantagem significativa, pois a localização e o isolamento de falhas são mais diretos. Sistemas radiais permitem a implementação de

dispositivos de proteção mais simples e eficientes, com melhor coordenação. Os sistemas de transmissão operam de forma malhada, de forma que algumas das técnicas de redução de perdas para redes de distribuição não são aplicadas nas redes de transmissão.

2. REDUÇÃO DE PERDAS ELÉTRICAS

As perdas de energia em uma rede elétrica podem ser calculadas como a diferença entre a energia injetada e a retirada dela. No sistema de transmissão, essas perdas são percentualmente menores do que na distribuição devido aos maiores níveis de tensão e menores correntes e são essencialmente técnicas. A seguir são listadas formas de mitigação de perdas técnicas em sistemas de energia elétrica.

- Reconfiguração ou mudança da topologia da rede elétrica.
- Operação da rede em níveis mais elevados de tensão, gerando correntes de magnitudes menores.
- Controle da tensão da rede para redução da carga elétrica. Como algumas cargas são dependentes da tensão do sistema, como motores e cargas resistivas, a redução do nível de tensão na carga pode reduzir o consumo de potência, levando a perdas menores. Essa tecnologia pode ser utilizada otimizando o posicionamento de transformadores com comutação automática de tap ou através da aplicação de tecnologias de otimização de tensão nos pontos de conexão das cargas.

- Inclusão na rede de níveis adequados de Geração Distribuída (GD).
- A presença de harmônicos na rede aumenta o aquecimento em equipamentos e condutores, aumentando as perdas elétricas e problemas de qualidade de energia. Dessa forma, estratégias de redução de harmônicos na rede auxiliam na diminuição das perdas técnicas.
- Emprego de transformadores mais novos e eficientes.
- Troca dos condutores elétricos (recabeamento). Neste aspecto pode-se realizar a troca de condutores antigos por outros mais eficientes e largos para se reduzir a resistência elétrica e as perdas.
- Instalação de equipamentos de controle de potência reativa. Devido ao acoplamento entre a potência reativa e o nível de tensão em sistemas de potência, vários equipamentos podem ser utilizados com a finalidade de otimizar o nível de tensão da rede e, conseqüentemente, reduzir as perdas elétricas. Pode-se utilizar, como exemplo, bancos de capacitores, bancos de reatores e compensadores estáticos da distribuição (DSTATCOM) com este objetivo.
- Balanceamento das fases do sistema. Um sistema trifásico desequilibrado apresenta perdas maiores devido à distribuição irregular do fluxo de potência pelas fases do sistema. O desequilíbrio também provoca a circulação de corrente no fio neutro, o que aumenta as perdas. Esse problema é menos pronunciado nos sistemas de transmissão devido à diversidade das cargas.

- Instalação de sistemas de armazenamento de energia, como os BESS (Battery Energy Storage Systems), que podem ser utilizados para reduzir perdas na rede elétrica, armazenando o excesso de energia gerada durante períodos de baixa demanda e liberando-a durante os picos de consumo, melhorando a eficiência e minimizando as perdas de transmissão e distribuição. Em [1] é apresentada uma aplicação para redução das perdas.
- Manutenção regular de cabos e equipamentos.
- Implementação de programas de resposta à demanda. Esses programas oferecem incentivos aos consumidores da rede elétrica para reduzirem o seu consumo durante os horários de pico, quando as perdas são elevadas devido às altas correntes.

Os métodos de redução de perdas apresentados podem ser empregados principalmente em sistemas de distribuição, mas nem todos podem ser aplicados na rede de transmissão, devido às características específicas desta rede.

As perdas não técnicas na distribuição compreendem o furto (ligação clandestina, desvio direto da rede), fraudes (adulterações nos medidores e desvios), erros de processamento de dados medidos e erros de faturamento e medição. Essas perdas podem ser reduzidas principalmente através da utilização de medidores inteligentes, que facilitam a detecção de fraudes e apresentam maior precisão nas medidas. A análise de dados e os algoritmos de aprendizado de

Projetados para uso em instalações de distribuição de energia elétrica comercial e industrial

- 225 a 8.000 kVA
- Classe 15 kV: NBI 95 kV
- Classe 24,2 kV: NBI 125 kV
- Classe 36,2 kV: NBI 150 kV
- Frequência: 60 Hz

Os transformadores Romagnole, atendem integralmente ao Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBR, no que tange os requisitos da Portaria Interministerial nº 104 de 22 de março de 2013.



máquina podem ser usados para identificação de padrões anormais de consumo que indiquem perdas. A segmentação da rede também é um método válido para redução de perdas, pois permite um melhor controle e monitoramento dos trechos de sistema.

Alguns métodos de redução de perdas elétricas em sistemas de potência podem ser modelados matematicamente através de um problema de otimização quando se deseja obter a solução ótima. Os métodos de alocação de equipamentos, como GD e capacitores, e o método de reconfiguração da rede estão incluídos nesta classe de métodos. Neste tipo de problema, o objetivo é reduzir o valor de uma ou várias funções, atendendo a uma série de restrições formadas por equações e/ou inequações que envolvem as variáveis do problema, e que limitam o espaço de busca da solução ótima. Esses problemas apresentam uma natureza combinatória quando existem variáveis binárias no problema. Isso dificulta a obtenção da solução ótima e é o caso da reconfiguração de redes e alocação ótima de equipamentos.

Pode-se utilizar algoritmos de otimização exatos de programação linear ou não linear e/ou algoritmos aproximados, como meta-heurísticas, para se determinar a melhor solução do problema. As meta-heurísticas têm sido bastante utilizadas para solucionar problemas de otimização de dimensões elevadas. Como exemplo de meta-heurísticas podemos citar os algoritmos genéticos, busca tabu, evolução diferencial, entre outros. Neste artigo, demonstra-se como algumas técnicas de redução de perdas elétricas podem ser utilizadas, mas sem a preocupação com a obtenção da solução ótima. No trabalho apresentado em [3], os autores fazem uma revisão de trabalhos que empregam a reconfiguração de redes, a alocação de GD e a alocação de capacitores para a redução de perdas elétricas. O artigo apresentado em [4] revisa os estudos que utilizam os métodos de reconfiguração de redes e alocação dos equipamentos de GD, capacitores e DSTATCOM, usados de forma individual ou combinada. As técnicas de otimização utilizadas em cada estudo também são indicadas.

3 - SIMULAÇÃO DE TÉCNICAS PARA REDUÇÃO DE PERDAS

Para ilustrar a aplicação de técnicas de redução de perdas, uma rede de distribuição de 33 barras é utilizada. Mostra-se como cada método pode ser implementado e os impactos resultantes na redução das perdas técnicas. A análise inclui simulações e comparações dos resultados, destacando a eficácia e as vantagens de cada abordagem. A rede de 33 barras e 37 linhas opera com uma tensão nominal de 12,66 kV. Ela possui 32 chaves de interconexão normalmente fechadas e 5 chaves de interconexão abertas. Os dados do sistema podem ser obtidos no banco de dados do Matpower [2]. O modelo de linha utilizado é o modelo de linha curta, em que o efeito capacitivo é desprezado, resultando apenas na impedância série. A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar do sistema, destacando as chaves abertas na configuração inicial. Verifica-se que na configuração inicial (caso base), as chaves abertas são a 33, 34, 35, 36 e 37. O sistema operando no caso base apresenta perdas ativas de 0,202677 MW e perdas reativas de 0,135141 Mvar.

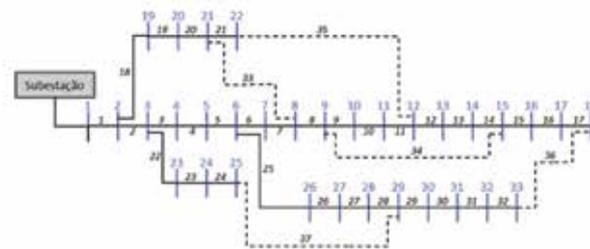


Figura 1 – Sistema de 33 barras e 37 linhas

Apresentam-se a seguir algumas técnicas que foram empregadas e simuladas no sistema teste, para demonstrar a sua eficácia na redução das perdas elétricas em relação ao caso base do sistema de 33 barras. Os resultados obtidos pela aplicação de cada uma das técnicas estão apresentados na Tabela 1.

3.1 Recabamento da Rede

O recabamento da rede envolve a substituição ou atualização dos cabos existentes por condutores com menor resistência elétrica. Este método reduz as perdas ôhmicas, que são proporcionais à resistência dos cabos e ao quadrado da corrente elétrica. Os parâmetros envolvidos no modelo de linha utilizado neste estudo são a resistência e a reatância indutiva. A resistência de um cabo é determinada pelo material condutor (cobre, alumínio etc.) e pela área da seção transversal. O cobre tem uma resistividade menor que o alumínio, o que resulta em menor resistência para um dado tamanho. A reatância indutiva depende da geometria do cabo, da disposição física dos condutores e da frequência da corrente. Devido a resistência do cabo ser o principal elemento relacionado com as perdas técnicas, uma simulação foi realizada considerando apenas a redução da resistência em 30%, simulando a troca dos condutores. Neste caso, as perdas ativas calculadas foram de 0,137516 MW. Comparando com o caso base, a redução foi de aproximadamente 32,15%.

Os custos de recabamento de uma rede de distribuição variam amplamente, influenciados por fatores como o tipo e as especificações dos condutores (alumínio ou cobre), os custos de mão de obra e instalação, os equipamentos e ferramentas necessários, além das despesas com interrupções de serviço e licenças. Embora o recabamento possa ser utilizado para minimizar perdas e aumentar a capacidade de transporte da rede, sua aplicação pode se tornar inviável devido aos altos custos envolvidos, necessitando, portanto, de uma análise aprofundada.

3.2 Alocação de Geração Distribuída

A alocação estratégica de GD permite a injeção de energia elétrica em pontos específicos da rede, reduzindo a necessidade de transportar energia por longas distâncias. A presença de GD próxima aos centros de carga pode minimizar as perdas de transmissão e distribuição, além de proporcionar maior confiabilidade e resiliência ao sistema. Ressalta-se, entretanto, que a presença de uma grande quantidade de GD na rede pode aumentar de maneira excessiva o fluxo de potência reverso, que flui dos geradores para os sistemas de distribuição e transmissão. Dessa forma, pode ocorrer um

CONTROLE DE RELIGADOR

RELÉ MULTIFUNÇÃO PARA CONTROLE, COMANDO E PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS:

- GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
- REDES DE DISTRIBUIÇÃO
- SUBESTAÇÕES

IED R550



SOFTWARE APLICATIVO



PARAMETRIZAÇÃO AMIGÁVEL



OS SETs DE PROGRAMAÇÃO



MEDIÇÃO E MONITORAMENTO



PERFIL DE CARGA



OSCILOGRAFIA



MEMÓRIA DE MASSA E REGISTRO DE EVENTOS

- FUNÇÕES DE PROTEÇÃO: 50/51, 50/51N, 67, 67N, 32, 59, 27, 62 e 79
- CONTADORES DE OPERAÇÃO
- LOCALIZADOR DE FALTAS
- OSCILOGRAFIA
- MEDIÇÃO E MONITORAMENTO
- REGISTRO DE DADOS
- 4 ENTRADAS DE CORRENTE CA (3 FASES / 1 NEUTRO)
- 6 ENTRADAS DE TENSÃO (3 FONTES / 3 CARGAS), PROTEGIDAS POR VARISTORES
- PAINEL FRONTAL COM LEDs DE INDICAÇÃO E BOTÕES DE ACESSO DIRETO
- PAINEL RGB HT COM TOUCH-SCREEN E TELAS CONFIGURÁVEIS
- SOFTWARE APLICATIVO GRATUITO PARA PROGRAMAÇÃO, OSCILOGRAFIA, ETC

PROJETADO PARA MÁXIMA CONFIABILIDADE EM AMBIENTES EXTERNOS AGRESSIVOS



PEXTRON®

Av. Miruna, 502 – Moema – São Paulo – SP
vendas@pextron.com.br – www.pextron.com



VENDAS: +55 (11)
5094-3200

aumento das perdas, ao invés da sua redução. Para se determinar a quantidade ótima de GD a ser inserida na rede, é necessário a definição de índices de desempenho, relacionados aos objetivos operacionais do SEP. Logo, o desempenho do sistema pode melhorar ou piorar após a conexão da GD. Uma deterioração do suprimento não é uma preocupação direta, desde que a qualidade permaneça dentro de níveis aceitáveis. Para cada índice de desempenho existe um limite que não deve ser ultrapassado. Na prática, muitos índices de desempenho são definidos de forma que valores menores correspondem a desempenhos melhores, como perdas elétricas e risco de sobrecarga. A Figura 2 ilustra como o índice de desempenho de perdas elétricas varia no sistema de distribuição em função da quantidade de GD presente na rede.

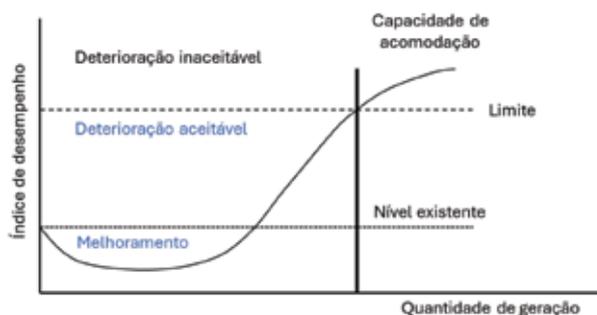


Figura 2 – Variação das perdas em função da quantidade de GD

Considerando o sistema teste, a alocação de uma fonte de GD com capacidade de 2 MW na barra 10 reduz as perdas ativas para 0,1356 MW, proporcionando uma redução de 36,76%.

Vale destacar que a implantação GD na rede de distribuição envolve investimentos em equipamentos como painéis solares, turbinas eólicas e geradores de biomassa, além de custos com instalação e conexão à rede, incluindo mão de obra, infraestrutura e equipamentos de interconexão. Custos contínuos incluem manutenção, operação e conformidade regulatória. Empresas podem lucrar com a venda de energia para a rede, aproveitar incentivos fiscais, obter créditos de carbono e economizar com o autoconsumo. Além dos benefícios financeiros, a GD melhora a operação da rede ao reduzir perdas técnicas, aumentar a eficiência e fornecer uma fonte de energia complementar. A escolha estratégica do local de instalação da GD e sua capacidade é crucial para reduzir as perdas.

3.3 Alocação de Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores são utilizados para compensar a potência reativa, melhorando o fator de potência e reduzindo

as perdas na rede elétrica. A alocação adequada de capacitores ao longo da rede de distribuição pode diminuir a corrente total demandada, resultando em menores perdas de energia e uma operação mais eficiente do sistema elétrico.

Adicionando-se na barra 15, 1 Mvar de potência reativa capacitiva, as perdas ativas são reduzidas em aproximadamente 8,7 %. O valor de perdas calculado ficou em 0,135141 MW.

A implantação de bancos de capacitores envolve um investimento inicial significativo, bem como custos contínuos de manutenção e operação. No entanto, os benefícios associados à melhoria do fator de potência, redução de perdas elétricas, estabilização da tensão e economia de energia geralmente superam os custos, resultando em um sistema elétrico mais eficiente, confiável e econômico. A análise de custo-benefício deve ser realizada com base nas condições específicas de cada sistema elétrico para determinar a viabilidade e o retorno esperado do investimento.

3.4 Reconfiguração da Rede

A reconfiguração da rede envolve a alteração da topologia radial da rede de distribuição através da abertura e fechamento de chaves seccionadoras de forma a se obter uma configuração com índice de perda menor. Esta técnica permite a redistribuição das cargas, equilibrando a corrente nas diversas seções da rede e minimizando as perdas. A reconfiguração pode ser realizada de forma periódica ou em tempo real, adaptando-se às condições operacionais e demandas de carga. A reconfiguração da rede de distribuição envolve custos em aquisição de equipamentos, como chaves seccionadoras, quando não estão disponíveis na rede. No entanto, os benefícios incluem redução de perdas técnicas, melhoria da confiabilidade, aumento da capacidade de atendimento, melhor integração de GD e melhoria da qualidade de energia. Uma análise detalhada de custo-benefício é essencial para determinar a viabilidade e a eficácia da reconfiguração da rede.

No caso teste, a rede a rede passando a operar com as chaves 7-9-14-32 e 37 abertas proporciona uma redução das perdas ativas de 31,15%, passando para 0,139551MW. A tabela 1 mostra o resultado.

3.5 Aumento da Tensão de Operação da Rede

Elevar a tensão de operação da rede é uma estratégia eficaz para reduzir as perdas técnicas. Ao aumentar a tensão, a corrente elétrica necessária para fornecer a mesma quantidade de potência é reduzida, o que, por sua vez, diminui as perdas ôhmicas. Esta técnica requer uma cuidadosa análise dos

TABELA 1 – RESUMO DOS RESULTADOS

Casos	Procedimento	MW	MVar	% de redução (W)	% de redução (Var)
Base	-	0,202677	0,135141	0%	0%
Capacitor	1,0 MVar na barra 15	0,184894	0,12694	8,77	6,07
GD	GD de 2,0 MW na barra 10	0,128163	0,088953	36,76	34,18
Reconfiguração	chaves abertas 7-9-14-32 e 37	0,139551	0,102305	31,15	24,30
Recabeamento	Resistência de 70% do caso base	0,137516	0,130937	32,15	3,11
Aumento de tensão	12,66 kV para 21 kV	0,067168	0,044723	66,86	66,91

equipamentos e a adequação da infraestrutura para suportar a nova tensão de operação.

Aumentando-se a tensão nominal de operação da rede teste de 12,66 kV para 21 kV, tem-se uma redução das perdas ativas de 66,86 %. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Aumentar a tensão em redes de distribuição envolve custos significativos relacionados à atualização de equipamentos. No entanto, os benefícios obtidos, como a redução de perdas técnicas, aumento da capacidade de transmissão, melhoria da eficiência energética e da qualidade de energia, e vantagens econômicas à longo prazo, frequentemente superam os custos. Uma análise detalhada de custo-benefício específica para a rede em questão é essencial para determinar a viabilidade e a eficácia dessa mudança.

4. CONCLUSÕES

Em um sistema elétrico de potência, a maior parte da potência gerada é transferida através de um sistema de transmissão até alcançar os consumidores no sistema de distribuição, que opera em níveis de tensão alta, média e baixa. As perdas elétricas na distribuição são mais elevadas do que na transmissão devido às baixas tensões, elevada relação R/X dos cabos e altas correntes. No entanto, a redução das perdas elétricas traz benefícios para todo o sistema. Esses benefícios são técnicos e econômicos e, por isso, vários métodos são utilizados e novos são pesquisados, para se conseguir reduzir as perdas totais. Através da utilização de uma rede teste, foram simuladas computacionalmente algumas técnicas de redução de perdas e os seus resultados foram apresentados. Verifica-se que as técnicas são válidas e contribuem para uma operação mais eficiente do sistema. Destaca-se que algumas das técnicas podem apresentar resultados melhores se forem modeladas

matematicamente através de um problema de otimização. Várias técnicas de solução podem ser usadas para se tentar obter soluções ótimas, constituindo-se em um campo de pesquisa bastante importante e ávido por soluções inovadoras.

REFERÊNCIAS

- [1] da Silva, D. J., Belati E. A., and López-Lezama J. M. "A Mathematical Programming Approach for the Optimal Operation of Storage Systems, Photovoltaic and Wind Power Generation" *Energies* 16 (2023) <https://doi.org/10.3390/en16031269>
- [2] Zimmerman R. D., Murillo-Sanchez C. E., and Thomas R. J., "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, 12–19, Feb. 2011. DOI:10.1109/TPWRS.2010.2051168
- [3] Kalambe S., Agnihotri G. "Loss minimization techniques in distribution network: bibliographical survey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014) 184-200.
- [4] Sambaiah K. S., Jayabarathi T. "Loss minimization techniques for optimal operation and planning of distribution systems: A review of different methodologies". *International Transactions on Electrical Energy Systems* 2019 DOI: 10.1002/2050-7038.12230

**Haroldo de Faria Junior possui doutorado em Engenharia Elétrica pela COPPE – UFRJ e pós-doutorado pela Universidade de Liège. Atualmente é Professor Associado na Universidade Federal do ABC, no curso de Engenharia de Energia.*

**Edmarcio Antonio Belati é Professor Associado na Universidade Federal do ABC, onde ministra disciplinas no curso de graduação em Engenharia de Energia e nas pós-graduações em Engenharia Elétrica e Energia. *