



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS
E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

TECNOLOGIAS AVANÇADAS EM REATORES DERIVAÇÃO

**Luiz Eisi Yamazaki (*)
ABB Ltda**

**José Carlos Mendes
ABB Ltda**

**Jorge Inhasz
ABB Ltda**

RESUMO

O presente texto dá uma primeira apresentação de uma nova técnica para redução do nível de ruído de reatores derivação e transformadores. A técnica apresentada compreende um sistema de isoladores de vibração instalada entre o tanque e a parte ativa, combinada com elementos com baixa impedância acústica instaladas no fundo do tanque e na tampa. As primeiras experiências de ensaios na fábrica e instalações no campo são apresentadas e discutidas com o propósito de apresentar a técnica como tal e de colocar foco no crescente interesse dos clientes em reatores derivação com baixo ruído e baixa vibração.

PALAVRAS-CHAVE

Reator derivação, Ruído, Vibração, Transmissão, Isolação

1.0 - INTRODUÇÃO

Devido às elevadas forças magnéticas presentes em reatores derivação durante sua operação normal, vibração e ruído são, com frequência, aspectos determinantes no dimensionamento dos mesmos.

Do ponto de vista do usuário, por outro lado, crescem em importância as preocupações com o meio ambiente, levando a limites mais severos dos níveis de ruído de reatores novos.

Nos últimos cinco anos, o número de reatores que exigiu redução do nível de ruído através de meios externos ao tanque, como painéis de isolamento acústico ou enclausuramento, tem aumentado drasticamente.

O crescente uso de cabos subterrâneos e o aumento do número de plantas eólicas de geração de energia elétrica direcionam para a necessidade de instalação de novos reatores derivação. Em muitos casos, esses reatores são instalados em áreas mais densamente populadas que as áreas em que são instalados os reatores para compensação de longas linhas de transmissão de alta tensão. Isso também reforça a tendência de baixos níveis permitidos de ruído e de vibração.

Baixos níveis de ruído e de vibração estão se tornando sinônimos de qualidade de fabricação e de bom conceito de projeto. O propósito desta publicação é apresentar alguns métodos para reduzir o nível de ruído de reatores. Embora o conceito básico de dimensionamento e construção de reatores derivação esteja consagrado e maduro, há uma necessidade de novas idéias para reduzir o ruído devido às crescentes demandas por parte dos usuários. É também intenção dos autores estimular a inovação e discussão nesta área através da descrição do novo conceito para a redução do ruído.

2.0 - FUNDAMENTO TÉCNICO

Geração e transmissão do ruído

Reatores do tipo coluna com gaps têm o mesmo mecanismo de geração de ruído do transformador, ou seja, vibrações magnetostrictivas do material magnético do núcleo e as forças eletromagnéticas atuando nos enrolamentos. Adicionalmente existem altas forças magnéticas nos gaps entre as seções de aço silício das pernas principais. Este último efeito é a fonte predominante de vibrações de um reator. Ele causa a vibração no sentido vertical dos jugos horizontais e a vibração no sentido horizontal das pernas de retorno de fluxo, como consequência da vibração dos jugos. As vibrações verticais do núcleo são transmitidas principalmente para a base e para a tampa do tanque do reator através das estruturas mecânicas de suporte e também através do óleo isolante, que atua como um transmissor efetivo.

A baixa compressibilidade do óleo faz com que a base do tanque e a tampa vibrem quase que exatamente como a vibração do núcleo, sem qualquer redução significativa. As vibrações horizontais das pernas laterais são transmitidas principalmente para as paredes do tanque através das estruturas de suporte mecânico, se existirem, e através do óleo. Dependendo da distância entre o núcleo e a parede do tanque, pode existir alguma redução da vibração da parede, quando comparada com a do núcleo.

O núcleo, como uma fonte, excita o tanque com suas básicas e comparativamente pequenas vibrações, porém o tanque responde adicionando vibrações livres em um padrão mais complicado (veja figura 1).

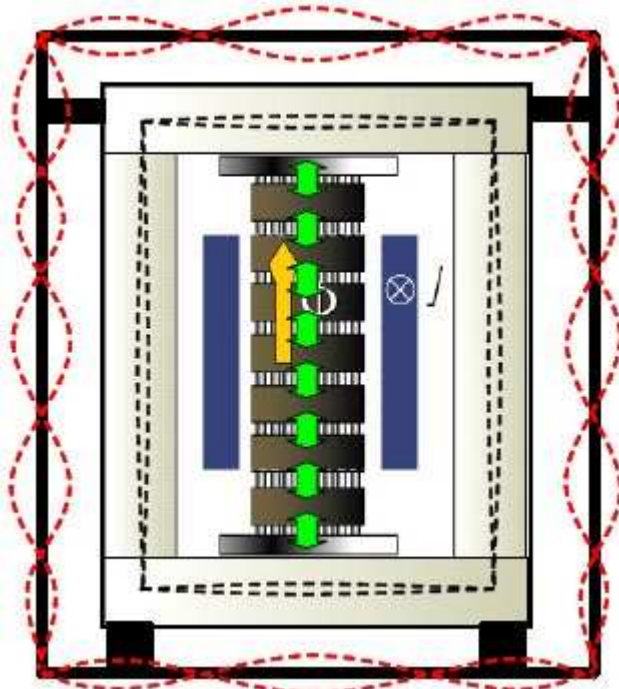


Figura 1 Esquema de forças e vibrações em núcleo e tanque de reatores

3.0 - MÉTODOS PARA REDUZIR O RUÍDO

Para reduzir o ruído em reatores grandes as seguintes opções são disponíveis:

- Reduzir as forças dos gaps reduzindo a densidade de fluxo. A força varia com o quadrado da densidade de fluxo e a potência acústica com a 4ª. Potência. Entretanto reduzir a densidade de fluxo não é uma solução tão eficaz, além de ter um alto custo.
- Projetar o núcleo e o tanque de forma a evitar ressonância com a frequência fundamental de vibração 100 ou 120 Hz e múltiplos destas. Isto deve ser sempre feito e tem apenas um efeito marginal no custo, em alguns casos.
- Isolação de vibração entre o núcleo e o tanque – simples e eficaz à primeira vista porém muito complicado na realidade, como será mostrado a seguir.
- Painéis de isolamento sonora ou enclausuramento cobrindo partes do tanque ou do reator completo – o efeito que se pode atingir depende de quanto da área do tanque pode ser coberta. Em princípio 50% de cobertura resulta em 3 dB de redução de potência acústica. Se a maior parte do reator pode ser coberta esta é uma solução economicamente eficaz.

3.1 Modelos de isolamento entre as vibrações do núcleo e o tanque

3.1.1 Perda de inserção

A perda de inserção (DIL) descreve o quanto uma vibração é amortecida. Quanto maior a perda de inserção, melhor é o amortecimento. Ela é dada pela relação entre a força (F') que atua na estrutura suporte, se a massa vibrante é diretamente conectada a ela, e a força atuante na estrutura no caso de existir um material de amortecimento entre a massa e a estrutura suporte (F). A relação pode ser dada também pelas correspondentes velocidades (v e v'). A definição do DIL é de acordo com a fórmula (1)

$$D_{IL} = 10 \log \left| \frac{F'}{F} \right|^2 = 10 \log \left| \frac{v'}{v} \right|^2 \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

3.1.2 Modelo Tradicional

No modelo tradicional a parte interna do reator que vibra é considerada como a massa conectada à fundação, através de uma mola. Este modelo assume que o reator está posicionado com o fundo do tanque diretamente sobre uma fundação rígida de concreto.

A mola então simboliza camadas elásticas resilientes que estão conectando as partes vibrantes internas com o fundo do tanque. Este modelo não é bom para frequências maiores pois as partes vibrantes internas, nesse caso, não se comportam mais como massas rígidas.

3.1.3 Modelo baseado nas impedâncias mecânicas

Neste modelo a parte vibrante interna do reator e a fundação são consideradas como corpos com certas impedâncias mecânicas, que são conectadas umas às outras por isoladores com determinada impedância de transferência.

No modelo tradicional assume-se que a impedância da fundação é muito alta (é imóvel). Isso pode ser visto como um caso simplificado do modelo baseado nas impedâncias mecânicas e não pode ser utilizado se o reator estiver suportado por rodas ou outros suportes locais.

Neste modelo, a impedância de entrada (Z_1) da estrutura vibrante é definida como a força de entrada (F_1) em um determinado ponto dividido pela resposta em velocidade no mesmo ponto (v_1).

A impedância de transferência é o quociente entre a força de entrada em um ponto e a resposta em velocidade em outro ponto.

A perda de inserção pode finalmente ser escrita conforme a fórmula (2):

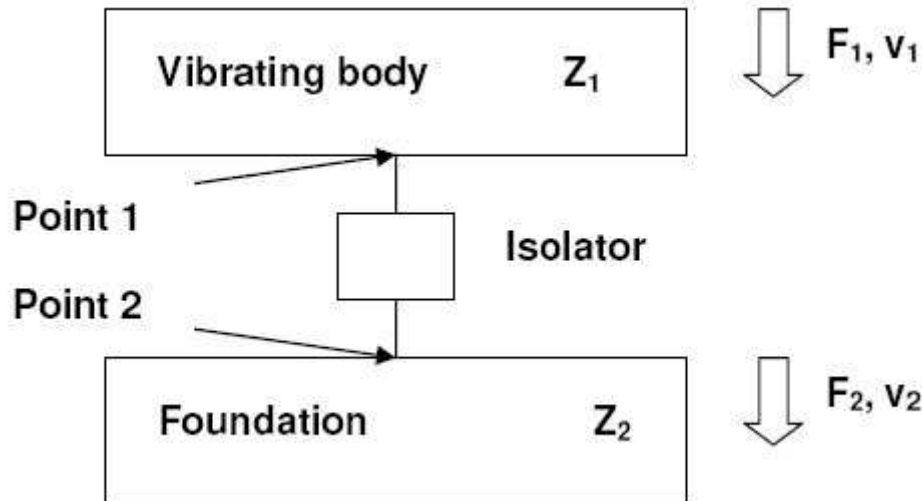


Figura 2 Esquema do modelo baseado nas impedâncias mecânicas

$$D_{ii} = 10 \log \left| \frac{F'}{F} \right|^2 = 10 \log \left| \frac{(Z_{11} + Z_1)(Z_{22} + Z_2) + Z_{12}Z_{21}}{(Z_2 + Z_1)Z_{21}} \right|^2 \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Onde o isolador é descrito por quatro impedâncias características [1]:

Z_{11} = Impedância de entrada no ponto 1

Z_{22} = Impedância de entrada no ponto 2

Z_{12} = Impedância de transferência do ponto 1 para o ponto 2

Z_{21} = Impedância de transferência do ponto 2 para o ponto 1

3.1.4 Modelo baseado na interação da estrutura fluida

Este modelo é um desenvolvimento posterior ao do modelo baseado nas impedâncias mecânicas. Um método para calcular as impedâncias mecânicas do sistema completo foi desenvolvido e é usado para dimensionar os isoladores de vibração.

4.0 - SOLUÇÕES PRÁTICAS PARA A ISOLAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

4.1 Molas sob o núcleo

Utilizando a teoria tradicional simplificada descrita acima, normalmente não é um problema selecionar e instalar elementos de borracha sintética ou montagens maquinadas que sejam à prova de óleo e que podem dar qualquer efeito isolante, em teoria. É apenas uma questão de selecionar um material elástico que tenha uma constante de mola que, em conjunto com a massa da parte ativa do reator, resulte em uma frequência de ressonância que seja suficientemente abaixo de 100 ou 120 Hz.

A experiência, entretanto, tem mostrado que isso raramente dá o efeito esperado. A razão é que, assumir um núcleo sólido e uma fundação sólida não é correto nessas frequências. A menos que o reator esteja montado em uma fundação sólida de concreto, suportando diretamente sob os suportes internos do núcleo, é necessário calcular as impedâncias mecânicas do núcleo e da fundação e escolher um material elástico que seja consideravelmente mais macio, ou seja, que tenha impedância menor que o núcleo e a fundação.

4.2 Considerando a transmissão do fluido

Mesmo após escolher uma manta anti vibração apropriada em relação à impedância do núcleo e da fundação, existe mais um obstáculo que reduz ou até mesmo elimina o efeito da isolação.

O volume de óleo entre o núcleo e o tanque, especialmente em reatores que têm grandes áreas planas faceando a base do tanque e da tampa, transmitirá as vibrações facilmente para o tanque, curto circuitando, assim, as mantas anti vibração.

Esse efeito pode ser considerado no projeto incluindo o óleo como mais um elemento de impedância atuando em paralelo com as molas originais, e então projetar a mola total para ser suficientemente macia (impedância suficientemente baixa) em comparação com o núcleo e da fundação.

A nossa experiência, entretanto, é que esse efeito do óleo cria um grande problema quando escolhemos molas adequadas para dar uma isolação eficaz.

4.3 A Membrana de Absorção

4.3.1 Fundamentos e tentativas prévias

É muito bem conhecido que uma parte importante da transmissão do ruído do núcleo para o tanque em transformadores e reatores vem pelo óleo, que pode ser considerado como incompressível nas frequências de interesse em ruído de transformadores e reatores.

No passado os fabricantes de transformadores tentaram diferentes maneiras para eliminar ou ao menos reduzir a transmissão do ruído através do óleo. A primeira idéia foi de prover um tanque extra isolante de vibração por dentro ou por fora do tanque original. Veja por exemplo a ref. (2). O espaço intermediário foi preenchido com ar ou foi feito vácuo, com excelente redução de ruído como efeito.

Outras soluções envolveram a colocação de uma camada elástica preenchida com ar ou sob vácuo sobre as paredes do tanque. A ref. (3) é um bom exemplo.

4.3.2 A nova solução

O Novo sistema para isolação da vibração entre o núcleo e o tanque é um melhoramento das idéias e sugestões descritas acima. Ele consiste de células metálicas que podem estar cheias de gás ou sob vácuo (4).

A célula é muito flexível, fornecendo uma interface de baixa impedância faceando a alta impedância do óleo. Através desta diferença entre as impedâncias a energia das ondas sonoras é refletida e não passa através das células. O princípio de funcionamento é similar ao princípio do tanque duplo porém estes absorvedores internos de ruído atuam localmente e não cobrem a superfície do tanque por inteiro.

As membranas de absorção devem ser combinadas com mantas isoladoras de vibração que estejam propriamente dimensionadas considerando as impedâncias mecânicas do núcleo, da base do tanque e da fundação, do óleo em volta do núcleo e da membrana de absorção imersa no óleo.

Como teste inicial as células cheias de gás foram aplicadas em experiências com um modelo de transformador em escala, que provou que o efeito atenuante do ruído através do óleo era proporcional à área do núcleo que estava coberta pelas membranas de absorção (veja fig. 3).

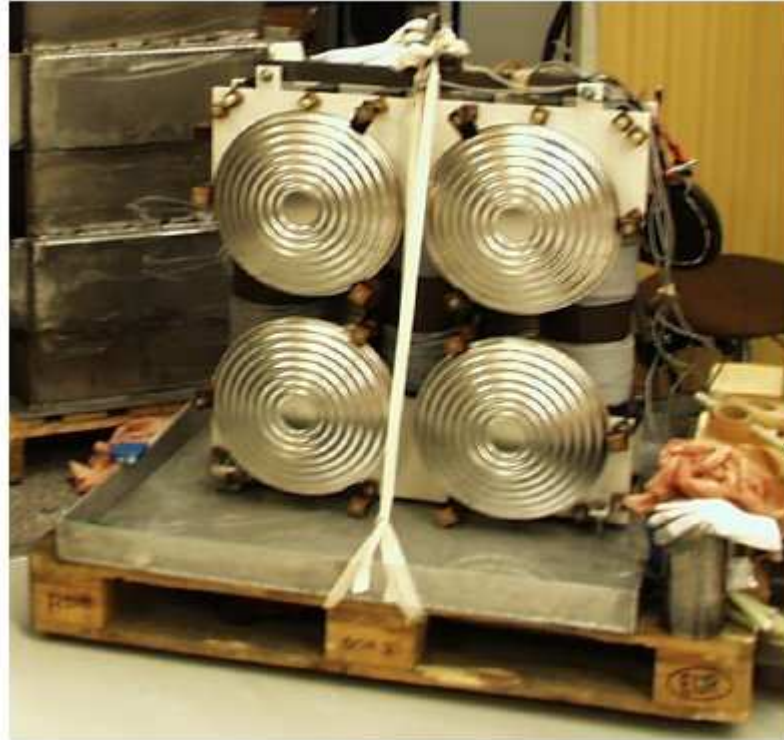


Figura 3 Membranas de absorção montadas em um modelo em escala de transformador

4.3.3 Teste em escala real

Após a execução dos testes no modelo, uma versão das membranas com vácuo foi aplicada em um transformador de 25 MVA.

Um número de células de membranas foi instalado nos espaços entre o jugo superior e a tampa e entre o jugo inferior e o fundo do tanque. A parte ativa foi suportada por isoladores metálicos que foram dimensionados para ter a constante de mola correta em relação às impedâncias mecânicas do núcleo e da base do tanque, respectivamente. Em um experimento bem controlado, uma redução de 3 dB foi obtida por esse sistema de molas sob o núcleo e pelas membranas de absorção.

O próximo passo foi aplicar o sistema em uma série de transformadores de 250 MVA (veja fig. 4). Desta vez um sistema similar foi incluído entre o núcleo do transformador e o fundo do tanque em todas as unidades de uma série.

Infelizmente não houve testes antes/após mostrando os efeitos da instalação do novo sistema, entretanto a série de transformadores foi ensaiada com sucesso, resultando em níveis de potência acústica extremamente baixos para essa potência.



Figura 4 Membranas de absorção em montagem em um transformador de 250 MVA

4.3.4 Aplicação em um reator derivação

O sistema foi instalado recentemente em um reator derivação trifásico de 150 MVAR para a SVK (Concessionária da Suécia). Veja figuras 5 e 6. Membranas de absorção foram instaladas nas partes superior e inferior do núcleo e adicionalmente também nas paredes do tanque próximas ao núcleo.

O núcleo foi suportado por elementos mola metálicos. O nível de potência acústica medido foi 2 dB menor que o de reatores similares entregues anteriormente, porém, considerando a variação inerente dos níveis de potência acústica entre reatores similares há dificuldade de se extrair uma conclusão firme a partir deste primeiro teste do sistema aplicado a um reator.

O ensaio foi repetido no campo, após um ano, aproximadamente, e o baixo nível de potência sonora medido no ensaio final na fábrica foi confirmado com menos de 1 dB de diferença.



Figura 5 Membranas de absorção montadas em um reator de 150 MVAR



Figura 6 Isoladores de vibração montadas no mesmo reator de 150 MVAR

4.3.5 Discussão

O texto apresentou uma nova solução para um velho problema: como tornar eficaz a isolamento da vibração entre núcleo e tanque em reatores isolados a óleo.

A solução foi verificada tanto no modelo em escala como em um número de modelos em escala real. A eficácia da solução ainda necessita ser melhor avaliada e comparada com outras opções para redução de ruído considerando custo versus eficácia.

A solução é uma alternativa pra casos onde a redução do ruído por meios externos por alguma razão não possa ser aplicada.

5.0 - CONCLUSÕES

- Ruído de grandes reatores é um problema importante que pode ser difícil e caro de resolver pelos métodos tradicionais de redução de ruído.
- A isolamento da vibração entre o núcleo e o tanque necessita ser projetada com cuidado, considerando as propriedades dinâmicas de todos os componentes envolvidos.
- Este paper apresentou uma solução alternativa para a isolamento da vibração, que tem sido aplicada com sucesso em transformadores de potência e pela primeira vez em um reator derivação.
- A eficácia e o custo da solução necessita ser avaliada em comparação com métodos convencionais.
- Novas soluções para redução de ruído de reatores devem se basear em um pleno entendimento da dinâmica estrutural e dos mecanismos acústicos envolvidos na geração e na transmissão do ruído.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) Cremer L. and Heckl M: "Structure-Borne Sound", Springer Verlag, ISBN 0-0-387-06002-2, 1973
- (2) Patent GB1387942 "Transformer with Liquid Cooling" Transformatoren Union AG 1972

- (3) Patent DE 3241932 "Transformator MIT olgekuhlten Aktivteil und schalldampfenden Resonatoren",
Transformator Union AG 1984
(4) Patent US6661322B1, "Sound-insulating device for an insulating machine", ABB T&D Technology Ltd. 2003

7.0 - BIOGRAFIA

Luiz Eisi Yamazaki

Nascido em São Paulo em 28 de agosto de 1956

Formado em engenharia de eletricidade pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1980

Gerente de Engenharia de Cálculo de Transformadores e Reatores Novos

ABB Ltda – Guarulhos - Brasil