

## DEFEITOS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

### 1. Introdução

Os transformadores de potência são componentes críticos em sistemas de energia elétrica, tendo como função aumentar ou reduzir os níveis de tensão de forma a tornar mais eficiente a transmissão e a distribuição da energia elétrica. Os transformadores são projetados para lidar com potências elevadas, tornando-os vulneráveis a vários tipos de defeitos e problemas operacionais. Para garantir a sua operação de forma fiável e segura, os transformadores de potência requerem proteções eficazes.

A proteção de transformadores de potência abrange uma variedade de técnicas, dispositivos e sistemas que são implementados para detetar condições anormais de funcionamento, isolar os defeitos e evitar danos no transformador e no sistema de energia elétrica como um todo. Os principais objetivos da proteção de transformadores são: minimizar o tempo de saída de serviço, evitar defeitos de maior gravidade e preservar a integridade da rede elétrica.

A proteção de transformadores de potência envolve a combinação de um conjunto de considerações elétricas, mecânicas e térmicas. Defeitos por sobreintensidade, defeitos por sobretensões de origem atmosférica, defeitos de isolamento, defeitos nos enrolamentos e defeitos no núcleo podem representar sérios riscos à saúde do transformador e causar perdas financeiras significativas para as concessionárias ou indústrias.

Para proteger os transformadores de potência são utilizados dispositivos de proteção e relés. Esses dispositivos monitorizam continuamente vários parâmetros elétricos, como corrente, tensão, temperatura, formação de gás e nível de óleo, para detetar condições anormais de funcionamento e iniciar as medidas de proteção apropriadas.

Quando um defeito ou anomalia é detetada, os relés de proteção emitem alarmes e dão ordens de disparo para desligar o transformador de potência da rede, evitando danos maiores e garantindo a segurança de pessoas e equipamentos.



Figura 1 – Transformador de potência

### 2. Defeitos nos transformadores de potência

Os principais defeitos que podem ocorrer nos transformadores de potência são:

- Defeitos nos materiais dielétricos (óleo e isolamento dos enrolamentos).
- Defeitos nos enrolamentos.
- Defeitos por sobrecarga.
- Defeitos no núcleo (menos frequentes).
- Defeitos na cuba (pouco frequentes).

#### 2.1 Defeitos nos materiais dielétricos

Os defeitos mais comuns no óleo e no isolamento dos enrolamentos dos transformadores de potência podem afetar significativamente o seu desempenho e a fiabilidade.

Esses defeitos podem levar à rutura do isolamento, redução da rigidez dielétrica e a possíveis defeitos.

Os defeitos no óleo e no isolamento dos enrolamentos mais comuns são:

### **i. Deterioração do isolamento**

Com o tempo, os materiais de isolamento usados nos enrolamentos dos transformadores podem deteriorar-se devido a fatores como envelhecimento, stress térmico e entrada de humidade. Isso pode levar à redução da rigidez dielétrica do isolamento, ao aumento das perdas dielétricas e, por fim, à rutura do isolamento. Os materiais de isolamento mais comuns e afetados pela deterioração incluem-se o papel e o revestimento de verniz.

### **ii. Contaminação por humidade**

A humidade é um inimigo do isolamento dos transformadores. Ela pode penetrar nos enrolamentos através de juntas envelhecidas, vedações danificadas ou respiros defeituosos, levando a uma diminuição na resistência de isolamento e perda de rigidez dielétrica. A contaminação por humidade pode acabar com o isolamento e acelerar o processo de envelhecimento do transformador.

### **iii. Envelhecimento térmico**

Os transformadores quando operam com temperaturas elevadas podem acelerar o envelhecimento dos materiais de isolamento. A exposição contínua a altas temperaturas pode causar a degradação do isolamento, levando à redução da resistência mecânica, aumento da fragilidade e diminuição das propriedades dielétricas.

### **iv. Descargas parciais**

As descargas parciais (DP) são quebras localizadas do isolamento e podem ocorrer devido a defeitos ou imperfeições no isolamento. As DP geram sinais de alta

frequência e podem levar à formação de rachaduras e de percursos carbonizados dentro do isolamento. Quando em ausência de vigilância, as DP podem causar quebra de isolamento e defeitos graves [2].

### **v. Deslocamento do isolamento dos enrolamentos**

Vibrações e tensões mecânicas causadas por curto-circuitos, sobrecargas ou transporte podem resultar no movimento dos condutores dos enrolamentos. Este movimento pode levar à fricção do isolamento ou formação de pontos quentes, que podem comprometer a sua integridade.

### **vi. Contaminação do óleo**

O óleo dos transformadores de potência pode ficar contaminado com impurezas, como humidade, sujidade e partículas metálicas. O óleo contaminado pode levar à redução da rigidez dielétrica, aumento das perdas e envelhecimento acelerado do isolamento. Além disso, a presença de contaminantes pode causar reações químicas, o que pode afetar o desempenho do transformador [3].

Detetar e mitigar os defeitos no óleo e no isolamento é crucial para manter a fiabilidade e a longevidade dos transformadores de potência. A monitorização regular, testes de diagnóstico e boas práticas de manutenção, como análise de gás dissolvido, medição de resistência de isolamento e teste de descargas parciais, podem ajudar a identificar e a resolver esses problemas numa fase inicial, evitando defeitos graves e garantindo o desempenho ideal do transformador [4].

## **2.2 Defeitos nos enrolamentos**

Os enrolamentos dos transformadores são componentes críticos e os responsáveis pela transferência de energia elétrica. Qualquer defeito que ocorra nesses componentes podem afetar o desempenho, a fiabilidade e a vida útil do transformador.

Os principais defeitos que podem ocorrer nos enrolamentos dos transformadores são:

#### **i. Deterioração do isolamento**

Com o tempo, o material utilizado no isolamento dos enrolamentos do transformador pode-se deteriorar devido a fatores como stress térmico, entrada de humidade e envelhecimento. Essa deterioração pode levar à redução da resistência do isolamento, aumento das perdas dielétricas e quebra do isolamento [7].

#### **ii. Deslocamento do enrolamento**

Nesta situação estamos perante uma situação semelhante à situação do deslocamento do isolamento dos enrolamentos. Ou seja, vibrações, tensões mecânicas ou expansão e contração térmica podem fazer com que os condutores do enrolamento se desloquem. O deslocamento do enrolamento pode resultar na fricção ou formação de pontos quentes, levando à quebra do isolamento e possíveis curto-circuitos [8].

#### **iii. Contaminação do isolante dos enrolamentos**

A contaminação do isolamento dos enrolamentos pode ocorrer devido à presença de partículas estranhas, como poeira ou materiais condutores. A contaminação pode degradar as propriedades de isolamento, aumentar as perdas e potencialmente causar avarias elétricas [4].

#### **iv. Curto-circuitos no enrolamento**

Curto-circuitos entre espiras ou fases do enrolamento podem ocorrer devido a defeitos no isolamento ou devido a danos mecânicos. Os curto-circuitos nos enrolamentos podem causar aquecimento localizado, quebra de isolamento e, no limite, a defeitos de grande gravidade se não forem resolvidos imediatamente [5].

#### **v. Defeitos entre espiras**

Os defeitos entre espiras referem-se a defeitos que ocorrem entre espiras adjacentes do enrolamento. Esses defeitos podem ser o resultado de defeitos de isolamento, stress térmico, stress mecânico ou defeitos de fabrico. Os defeitos entre espiras podem levar a curto-circuitos, aumento da resistência do enrolamento e redução do desempenho do transformador [9].

#### **vi. Impactos mecânicos**

Os impactos mecânicos durante o manuseamento e transporte podem aplicar ao transformador uma força equivalente acima de 3g (g é a aceleração da gravidade;  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) podendo provocar distorção e/ou deslocamento dos enrolamentos e a conseqüente diminuição do seu isolamento.

Detetar e resolver os defeitos que podem ocorrer nos enrolamentos é crucial para garantir a adequada operação dos transformadores de potência.

Inspecções regulares, testes de diagnóstico e práticas de manutenção, como medição de resistência de isolamento, teste de descargas parciais e inspecções visuais, podem ajudar a identificar possíveis defeitos nos enrolamentos.

A manutenção e as reparações oportunas são essenciais para solucionar os defeitos nos enrolamentos e evitar mais danos de maior gravidade no transformador.

### **2.3 Defeitos por sobrecarga**

Um tipo de defeito que pode ocorrer nos transformadores de potência são as sobrecargas e podem ter implicações significativas no seu desempenho e fiabilidade. A sobrecarga refere-se à operação do transformador com uma carga superior à sua capacidade nominal, o que pode originar vários problemas ou defeitos, nomeadamente:

#### **i. Sobreaquecimento**

A sobrecarga implica o aumento da corrente elétrica nos enrolamentos do transformador, levando a maiores perdas resistivas e ao aumento temperatura. O sobreaquecimento pode resultar na degradação do isolamento, envelhecimento acelerado e, no limite, à perda do isolamento [7].

#### **ii. Deterioração do isolamento**

O calor excessivo gerado pela sobrecarga pode acelerar a deterioração dos materiais de isolamento. A degradação do isolamento pode reduzir a resistência do isolamento, aumentar as perdas dielétricas e, eventualmente, levar à quebra do isolamento [6].

#### **iii. Aumento da resistência dos enrolamentos**

A sobrecarga causa maiores perdas resistivas nos enrolamentos do transformador devido ao aumento da corrente elétrica. O aumento da resistência pode exacerbar os problemas de dissipação de calor, originando um sobreaquecimento adicional e possível degradação do desempenho [11].

#### **iv. Problemas de regulação de tensão**

A sobrecarga pode afetar a capacidade do transformador de manter os níveis de tensão especificados. À medida que a carga aumenta para além da capacidade nominal do transformador, podem ocorrer quedas de tensão e instabilidade no sistema de energia [12].

#### **v. Redução da vida útil do transformador**

A sobrecarga contínua pode reduzir significativamente a vida útil do transformador de potência. O aumento do stress devido ao aumento da temperatura, tensões mecânicas e deterioração do isolamento associados a condições de sobrecarga podem levar ao envelhecimento prematuro e possíveis defeitos [13].

#### **vi. Eficiência reduzida**

A sobrecarga leva ao aumento das perdas, principalmente das perdas resistivas, que reduzem a eficiência geral do transformador. Essa ineficiência resulta no aumento dos custos operacionais [7].

A operação prolongada de transformadores de potência com uma carga superior à sua capacidade nominal deve ser evitada. O correto planejamento da carga do transformador, boas previsões da carga e o dimensionamento apropriado do transformador são essenciais. De forma a evitar defeitos nos transformadores de potência a implementação de sistemas de monitorização e proteção, como relés de sobreintensidade e sensores de temperatura, pode ajudar na deteção precoce e providenciar a proteção adequada para mitigar o impacto da sobrecarga nos transformadores de potência.

### **2.4 Defeitos no núcleo**

Os defeitos no núcleo dos transformadores de potência podem ter implicações significativas no desempenho e na fiabilidade do transformador. O núcleo, é formado por chapas de aço laminadas, é responsável por fornecer um percurso de baixa relutância para o fluxo magnético, garantindo uma eficiente transferência de energia. No entanto, vários defeitos podem surgir no núcleo, afetando as suas propriedades magnéticas e potencialmente levar a problemas no transformador. Os defeitos mais comuns no núcleo dos transformadores de potência são:

#### **i. Deterioração do isolamento da laminação do núcleo**

As laminações do núcleo em transformadores de potência são revestidas com isolamento para reduzir as perdas por correntes parasitas. Com o tempo, esse isolamento pode-se deteriorar devido a fatores como humidade, temperatura ou envelhecimento. O isolamento deteriorado pode levar ao aumento das perdas por correntes parasitas e redução da eficiência do núcleo.

## II. Defeitos no empilhamento da laminação do núcleo

Durante o processo de fabrico, as laminações do núcleo são empilhadas para formar a estrutura do núcleo. No entanto, erros ou desalinhamento durante o empilhamento podem levar a defeitos de empilhamento, como rebarbas, desalinhamento ou folgas entre as laminações. Esses defeitos podem resultar no aumento das perdas magnéticas, distribuição de fluxo desigual e aquecimento localizado do núcleo.

## III. Vibração e ruído do núcleo

Nos transformadores de potência podem ocorrer vibrações e ruído no núcleo. Este fenômeno ocorre devido à expansão e contração induzidas pelo campo magnético das laminações do núcleo durante os ciclos magnéticos. Vibrações e ruído excessivos podem causar tensões mecânicas no núcleo, levando à fadiga e possíveis danos.

## IV. Saturação do núcleo

A saturação do núcleo ocorre quando o fluxo magnético no núcleo atinge o seu limite máximo, causando uma distorção da forma de onda de tensão. Isso pode acontecer devido sobrecargas ou mudanças bruscas nas condições de carga do transformador. A saturação do núcleo pode levar ao aumento das perdas do núcleo, eficiência reduzida e sobreaquecimento.

## V. Ligações acidentais à terra do núcleo

Ligações acidentais à terra do núcleo podem ocorrer devido a defeitos de isolamento ou a danos mecânicos. Estas ligações acidentais podem levar ao aumento das correntes parasitas, aquecimento do núcleo e quebra de isolamento.

## VI. Impactos mecânicos

Impactos mecânicos durante o manuseamento e transporte podem aplicar ao transformador uma força equivalente superior a 3g (g é a aceleração da gravidade;  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ), o que pode causar distorção do núcleo.

Detetar e mitigar defeitos no núcleo é crucial para garantir uma boa operação dos transformadores de potência. Inspeções regulares, medições de resistência de isolamento do núcleo e análise das vibrações podem ajudar a identificar possíveis defeitos no núcleo. Além disso, testes de diagnóstico, como medições de perda de núcleo e termografia infravermelha, podem fornecer informações valiosas sobre a condição do núcleo. A manutenção e a reparação imediata são essenciais para solucionar os defeitos principais e evitar danos mais graves no transformador [5][6].

### 2.4.1 Transporte de transformadores de potência

Após a descarga e o posicionamento do transformador de potência serem concluídos, o acelerómetro é removido e analisado para determinar se registou algum evento de choque.

A Tabela 1 da IEEE C57.93, 2007 [10] fornece valores que, se registados, devem resultar em discussões com o fabricante quanto à possibilidade de danos internos e a necessidade de investigações adicionais ou testes de diagnóstico.

Tabela 1 - Valores de aceleração que devem iniciar a discussão

Tipo de Impacto	Níveis de discussão
Longitudinal	3g
Vertical	2g
Transversal	2g

### 2.5 Defeitos na cuba

Os defeitos na cuba dos transformadores, mesmo que pouco frequentes, podem afetar o desempenho, a fiabilidade e a segurança do transformador.

Os defeitos que podem ocorrer na cuba dos transformadores são:

#### **i. Fugas de óleo**

Nos transformadores com isolamento a óleo, a cuba dos transformadores é cheia de óleo com o objetivo de transportar o calor para o exterior e providenciar isolamento. Defeitos nas juntas deterioradas, vedações danificadas ou defeitos de soldagem podem resultar em fugas de óleo. Essas fugas de óleo podem levar à redução das propriedades de isolamento, diminuição da eficiência da refrigeração do transformador e possíveis riscos ambientais [3].

#### **ii. Corrosão**

A presença de humidade ou de contaminantes na cuba do transformador pode levar à corrosão das superfícies metálicas. A corrosão enfraquece a integridade estrutural da cuba, levando potencialmente a fugas de óleo, comprometimento da refrigeração e até mesmo a defeitos graves [14].

#### **iii. Deformação da cuba**

Tensões mecânicas, como pressão interna excessiva ou impactos externos, podem causar deformação da cuba do transformador. A deformação pode levar ao desalinhamento dos componentes, aumento da tensão mecânica nas peças internas e prejudicar o desempenho do transformador [15].

#### **iv. Dispositivos de redução de pressão em caso de defeito**

A cuba dos transformadores é equipada com dispositivos de monitorização e controlo de pressão. Qualquer defeito ou mau funcionamento desses dispositivos pode levar ao aumento excessivo da pressão dentro da cuba durante condições de defeito, representando um risco de rutura ou explosão da cuba [16].

#### **v. Sistemas de drenagem defeituosos**

As cubas dos transformadores são equipadas com sistemas de drenagem para remover qualquer humidade ou contaminantes acumulados. Falhas no sistema de drenagem, como drenos entupidos ou instalados incorretamente, podem resultar em drenagem deficiente, levando ao aumento dos níveis de humidade e possível degradação do isolamento [6].

A manutenção adequada, inspeções regulares e testes são fundamentais na identificação e resolução dos defeitos nas cubas dos transformadores. Técnicas de diagnóstico como análise de óleo, inspeções visuais e testes de pressão podem ajudar a detetar e a mitigar esses defeitos. A conformidade com as normas, diretrizes do fabricante e recomendações de especialistas é essencial para manter a integridade e a segurança a cuba dos transformadores de potência.

### **3 Conclusões**

Em suma, a operação e manutenção eficazes dos transformadores de potência são essenciais para a estabilidade e eficiência dos sistemas de energia. Os vários tipos de defeitos em transformadores de potência nomeadamente, defeitos nos enrolamentos, defeitos de isolamento, defeitos por sobrecarga, defeitos no núcleo e defeitos na cuba, quando não verificados, podem causar sérios danos não apenas aos próprios transformadores, mas também ao sistema de energia como um todo e originar perdas financeiras.

O recurso a técnicas de deteção e diagnóstico desses defeitos, como análise de gás dissolvido no óleo, análise de resposta de frequência e vários tipos de tecnologias de monitorização, são fundamentais na identificação e diagnóstico dos defeitos na sua fase inicial. Essas técnicas juntamente com boas práticas de manutenção proativa, podem reduzir significativamente o risco de defeitos dos transformadores.

No entanto, embora apesar dos avanços tecnológicos nesta área nomeadamente, na deteção e diagnóstico dos defeitos, mantém-se a necessidade de pesquisa e inovação contínua neste campo. No futuro a investigação nesta área deve-se concentrar no desenvolvimento de ferramentas de diagnóstico mais avançadas e fiáveis, aprimorando a precisão dos modelos de previsão e integrando tecnologias de IA e de aprendizagem máquina em sistemas de monitorização dos transformadores.

#### 4 Bibliografia

- [1] M. Bolotinha, "Defeitos nos transformadores de potência," Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/defeitos-nos-transformadores-e-protecções-manuel-bolotinha> (30/05/2023).
- [2] J. H. Kitaygorsky, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment," John Wiley & Sons, 2019.
- [3] J. Das, "Insulating Liquids: Their Function and Analysis," ASTM International, 2000.
- [4] G. Anderson, A. Farag, R. Watson, Protective Relaying Principles and Applications, CRC Press, 2018.
- [5] J. Duncan Glover, M. S. Sarma, T. Overbye, "Power System Analysis and Design," Cengage Learning, 2017.
- [6] G. Anderson, A. Farag, R. Watson, "Protective Relaying Principles and Applications," CRC Press, 2018.
- [7] H. Gonen, "Electric Power Distribution Engineering," CRC Press, 2014.
- [8] S. Rao, "Switchgear and Protection, Khanna Publishers," 2007.
- [9] A. T. Johns, S. K. Salman, "Fault Detection in Power Transformers," IET, 2012.
- [10] IEEE Guide of Installation and Maintenance of Liquid-immersed Power Transformers, IEEE Standard C57.93 – 2007, Março 2008.
- [11] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability," IEEE Press, 2003.
- [12] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas Overbye, "Power System Analysis and Design," Cengage Learning, 2017.
- [13] A. T. Johns, S. K. Salman, "Fault Detection in Power Transformers," IET, 2012.
- [14] G. T. Heydt, "Electric Power Quality," Stars in a Circle Publications, 2000.
- [15] T. E. Baker, "Protective Relaying Theory and Applications," CRC Press, 2018.
- [16] A. R. Bergen, Vijay Vittal, "Power Systems Analysis," Pearson Education, 2015.

[www.neutroaterra.blogspot.com](http://www.neutroaterra.blogspot.com)

