

[变压器]

高频变压器绝缘介质损耗

文/苟建民 谢晔源 张中锋 葛健
南京南瑞继保电气有限公司

电力电子技术的发展将变压器带入到千赫兹工作频率，在极大地减小变压器尺寸的同时，也使其绝缘介质损耗增大到不容忽视的程度。基于电容器模型，阐述了高频变压器绝缘介质损耗产生机理及其影响因素，并在分析和比较环氧树脂和硅树脂的介质损耗特性后指出，硅树脂因介质损耗小，且介质损耗随温度升高基本保持恒定，更适合用于高频变压器绝缘。

随着电力电子技术的发展，变压器由工频变压器进入到千赫兹工作频率的高频变压器，变压器尺寸大大减小。磁心截面积 A_c 和磁心窗口面积 A_w 的乘积与变压器额定功率 P_T 的关系式为

$$A_c A_w = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{P_T}{f k_w J_{rms,max} B_{max}} \quad (1)$$

式中， f 为变压器工作频率； $J_{rms,max}$ 为绕组最大电流密度； B_{max} 为最大磁感应强度； k_w 为磁心窗口填充率。

常规变压器损耗按照铜损和铁损进行分析。铜损为一二次绕组内阻产生的焦耳热，计算公式为

$$P_{铜} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (2)$$

式中， $P_{铜}$ 为变压器铜损； I_p 和 I_s 分别为一二次绕组电流； R_p 和 R_s 分别为一二次绕组电阻。

铁损包括磁滞损耗和涡流损耗，对于交流波形，通常采用斯坦尼兹公式进行分析，即

$$P_e = K f^\alpha B_{max}^\beta \quad (3)$$

式中， P_e 为变压器单位体积铁损； K 为比例系数； α 和 β 均为材料特性参数。

对于非交流波形，可采用改进广义斯坦尼兹公式，即

$$P_e = \frac{1}{T} \int_0^T k_i \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^\alpha (\Delta B)^{\beta-\alpha} dt \quad (4)$$

式中， T 为波形周期； ΔB 为磁感应强度峰值； k_i 为

波形系数，表达式为

$$k_i = \frac{K}{(2\pi)^{\alpha-1} \int_0^{2\pi} |\cos(\theta)|^\alpha 2^{\beta-\alpha} d\theta} \quad (5)$$

高频变压器工作在千赫兹频率，其绕组相当于电容极板，其间绝缘介质相当于电介质，介质损耗不容忽视。因此，高频变压器损耗除了考虑铁损和铜损外，还需要考虑绝缘介质损耗。

绝缘介质损耗机理

以电容模型来分析高频变压器绝缘介质损耗，如图1所示，幅值为 U_0 、角频率为 ω 的电压加在极板面积为 S 、极板间距为 d 的电容两端。电容电压可以表示为

$$U = U_0 e^{j\omega t} \quad (6)$$

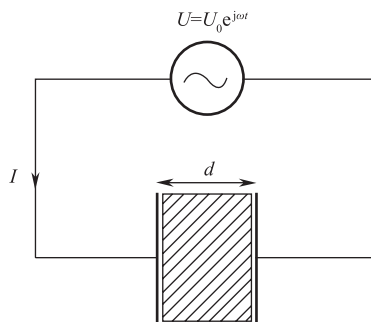


图1 绝缘介质损耗分析电容模型

在交变电场下, 绝缘介质相对介电常数须表示为复数形式, 即

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (7)$$

式中, ε^* 为复相对介电常数; ε' 为复相对介电常数实部, 等价于静电场下介质相对介电常数; $-\varepsilon''$ 为复相对介电常数虚部。

电容 C 为

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon^* \frac{S}{d} \quad (8)$$

式中, ε_0 为真空介电常数, 数值为 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$; S 为极板面积; d 为极板间距。

电容电流 I 为

$$\begin{aligned} I &= C \frac{dU}{dt} \\ &= \varepsilon_0 (\varepsilon'' + j\varepsilon') \omega \frac{U}{d} S \end{aligned} \quad (9)$$

电容视在功率为

$$\begin{aligned} UI &= \varepsilon_0 (\varepsilon'' + j\varepsilon') \omega \left(\frac{U}{d} \right)^2 Sd \\ &= 2\pi f (\varepsilon_0 \varepsilon'' + j\varepsilon_0 \varepsilon') E^2 V \end{aligned} \quad (10)$$

式中, E 为介质电场强度; V 为介质体积。

单位体积介质损耗功率 w_d 为

$$\begin{aligned} w_d &= 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \\ &= 2\pi f \varepsilon E^2 \tan \delta \end{aligned} \quad (11)$$

式中, ε 为材料介电常数, 即 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon'$; $\tan \delta$ 为介损因数, 且 $\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ 。

w_d 与工作频率、材料介电常数、电场强度的平方及介损因数成正比, 对于使用同一绝缘材料的工频变压器和高频变压器, w_d 可能相差数十倍甚至上百倍。

更进一步, 材料介电常数受频率和温度的影响。若将电介质极化过程视为理想德拜过程, 则其复相对介电常数可以表示为

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + j\omega\tau e^{-\frac{W_a}{kT}}} \quad (12)$$

式中, ε_∞ 为动态相对介电常数; τ 为介质弛豫时间; W_a 为介质活化能; k 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度。

介电常数变化为

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \quad (13)$$

式中, ε_s 为静态相对介电常数。

对于同一介质, 通过增高温度或者提高频率可以得到相同的复相对介电常数 ε^* , 即随着温度升高, 介质响应将迁移到更高的频率。

式 (12) 和式 (13) 中动态相对介电常数 ε_∞ 及静态相对介电常数 ε_s 可从介质极化过程来理解, 如图2所示。在 t_0 时刻介质外加恒定电场, 介质中的快速极化过程可认为立即完成, 即 t_0 时刻极化强度 P 达到 P_∞ , 如式 (14) 所示。当电场加于介质足够长时间时, 极化强度 P 将达到饱和值 P_s , 如式 (15) 所示。

$$P(t=t_0) = P_\infty \quad (14)$$

$$P(t \rightarrow t_\infty) = P_s \quad (15)$$

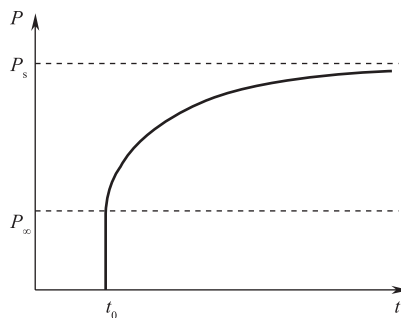


图2 恒定电场作用下介质极化强度变化示意图

在交变电场下, 极化强度随时间变化可表示为

$$P(t) = \varepsilon_0 (\varepsilon_\infty - 1) E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t-t_0) E(t_0) dt \quad (16)$$

式中, $f(t)$ 为介质响应函数。

在直流电场下, 电介质通常用电阻 R_0 和电容 C_0 的并联来表示, 其中, R_0 表征介质直流电阻, C_0 表征介质体电容。而在交流电场下, 考虑到介质导电和极化的复杂性, 广泛采用扩展德拜模型来表示介质。如图3所示, 扩展德拜模型中, 除了基础的 R_0 和 C_0 , 还增加了多个 RC 串联支路。每个 RC 串联支路对应一个彼此独立的极化过程。根据介质材料的不同, 极化过程可归为体极化、表面极化及通道极化等。

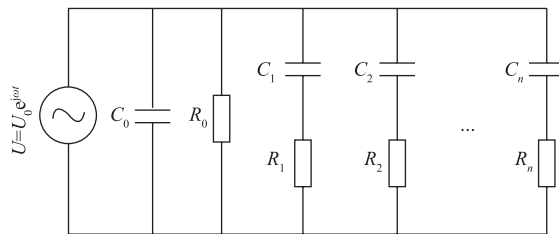


图3 扩展德拜模型

扩展德拜模型中的串联 RC 支路 R_i 、 C_i ($i=1,2,\dots,n$) 可以等效为对应的并联 RC 支路 R_{ieq} 、 C_{ieq} ($i=1,2,\dots,n$)，如图4所示。经上述等效后，介质的总体等效电容 C_{eq} 和总体等效电导 σ_{eq} 可分别表示为

$$C_{eq} = C_0 + C_{1eq} + C_{2eq} + \dots + C_{neq} \quad (17)$$

$$= C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega\tau_i)^2}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_{1eq}} + \frac{1}{R_{2eq}} + \dots + \frac{1}{R_{neq}} \quad (18)$$

$$= \frac{1}{R_0} + \omega \sum_{i=1}^n \frac{C_i \omega \tau_i}{1 + (\omega\tau_i)^2}$$

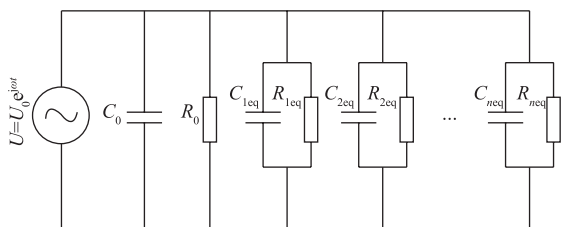


图4 串联 RC 支路等效为并联 RC 支路的扩展德拜模型

式中， $\tau_i = R_i C_i$ ($i=1,2,\dots,n$) 为时间常数； σ_i ($i=1,2,\dots,n$) 为电导。

经上述等效，对应介损因数可以表示为^[9]

$$\tan \delta = \frac{\sigma_{eq}}{\omega C_{eq}} \quad (19)$$

由式(19)也可得到，介损因数受频率和温度的共同影响。

环氧树脂和硅树脂介质损耗特性

环氧树脂和硅树脂是较为常见的绝缘材料，在电力变压器、功率器件及电路板等的绝缘中得到了广泛的应用。

Hiroshi Kurita等人研究了100 kHz工作频率下环氧树脂及硅树脂介损因数和相对介电常数随温度的变化情况，分别如图5和图6所示。由图5可以看到，环氧树脂介损因数在小于80 °C温度范围近似保持恒定，在大于80 °C温度范围随温度升高显著增大；硅树脂介损因数在所研究温度范围内近似保持不变。由图6可以看到，环氧树脂相对介电常数在小于100 °C温度范围随温度升高缓慢增大，在大于100 °C温度范围随温度升高显著增大；硅树脂相对介电常数随温度升高略有减小。

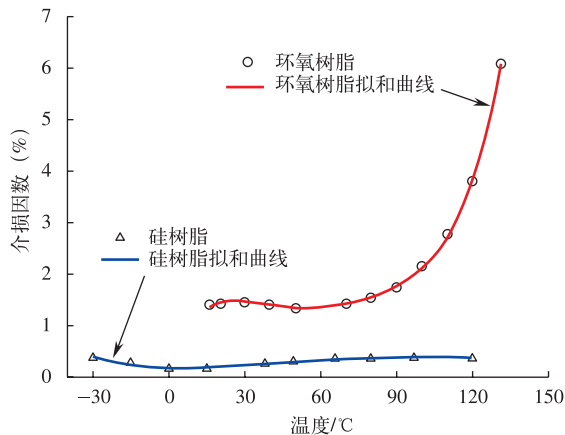


图5 100 kHz工作频率环氧树脂及硅树脂介损因数随温度变化

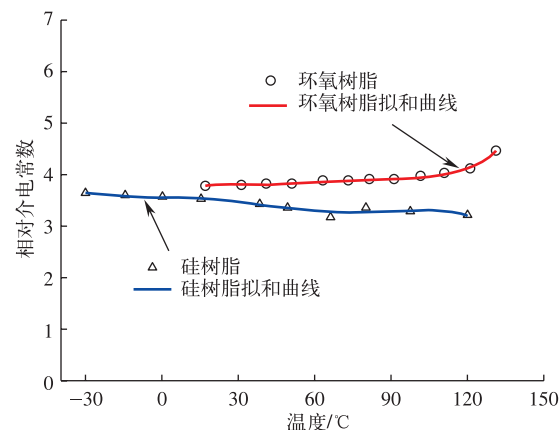


图6 100 kHz工作频率环氧树脂及硅树脂相对介电常数随温度变化

更进一步，结合介损因数和相对介电常数，可得环氧树脂和硅树脂的 ε'' 随温度变化曲线，如图7所示。环氧树脂 ε'' 在小于80 °C温度范围近似保持恒定，在大于80 °C温度范围随温度升高显著增大。硅树脂 ε'' 在所研究温度范围内近似保持不变。

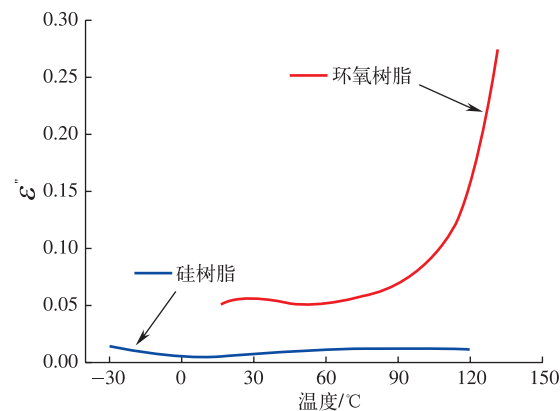


图7 100 kHz工作频率环氧树脂和硅树脂 ε'' 随温度变化

参考式(11)，在相同的工作频率和电场强度

下,单位体积介质损耗 w_d 与 ε'' 成正比。可知,环氧树脂介质损耗在小于80℃温度范围近似保持恒定,在大于80℃温度范围随温度升高显著增大。硅树脂介质损耗在所研究温度范围内近似保持不变。在小于80℃温度范围,环氧树脂介质损耗比硅树脂介质损耗高3~5倍,而当温度达到130℃时,环氧树脂介质损耗比硅树脂介质损耗高20倍以上。

根据式(12),对于同一介质,通过增高温度或者提高频率可以得到相同的复相对介电常数 ε^* ,结合图7所示100 kHz频率下环氧树脂和硅树脂 ε'' 随温度的变化曲线,可以得到10 kHz及1 kHz频率下环氧树脂和硅树脂 ε'' 随温度变化的预估曲线,如图8所示。工作频率的增加将压缩环氧树脂的使用温度范围,但对硅树脂无影响。

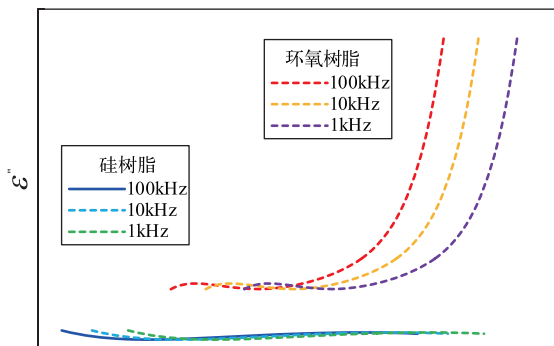


图8 10 kHz及1 kHz工作频率环氧树脂和硅树脂 ε'' 随温度变化预估曲线

综上所述,环氧树脂介质损耗较大,用于高频变压器绝缘中,在铜损、铁损及介质损耗共同作用下介质温度升高,而温度的升高将进一步增大介质损耗,如此可能导致介质出现热逸溃。与之相比,硅树脂介质损耗小,且介质损耗随温度升高近似保持恒定。从减小介质损耗及保持热稳定角度出发,应选择硅树脂作为高频变压器绝缘材料。

结束语

高频变压器工作频率进入千赫兹范围,在使变压器尺寸极大减小的同时,绝缘介质的损耗极大增加。绝缘介质介电常数受温度和频率的共同影响,即温度的升高使介质响应迁移到更高的频率。因此,绝缘介质损耗除了与频率相关,还受温度的影响。通过比较环氧树脂和硅树脂介质损耗随温度变化特性,发现硅树脂介质损耗小,且介质损耗在所研究温度范围内近似保持恒定,因而更适合用于高频变压器绝缘。EA

(收稿日期:2022-02-08)

参考文献

- [1] 张翰林,李祎春,陈应龙,等.大型变压器绝缘件监造典型案例[J].电气应用,2021,40(10):66-69.

(上接第42页)

结束语

总体来说,在当前电力企业经营运作过程中,远程集抄系统的使用帮助企业完成各项基础数据信息的收集管控,提高企业内部管控工作的质量和效率,降低企业线损,确保抄表管理工作更加高效、稳定。EA

(收稿日期:2022-06-04)

参考文献

- [1] 刘荣成,汪从勇.电力企业抄表核算收费智能化及应用[J].电子乐园,2019(23):139.
- [2] 王紫琪,阮颐,王甲.M-BUS远程集中抄表系统的设计[J].集成电路应用,2019(3):35-37.

- [3] 蔡华营.探析乡镇电网低压集抄用电采集系统的建设方案[J].低碳世界,2020,10(11):2.
- [4] 马俊明,张珍芬.浅谈电力大数据在电网建设中的运用[J].中国新通信,2020(1):1.
- [5] 涂炼,张水平,左剑,等.大数据技术在电网数据上的应用[J].电气应用,2021,40(10):52-57.
- [6] 郑斌,裴炜浩,侯素颖,等.基于电力大数据分析的电力消费指数研究与应用[J].电气应用,2021,40(1):66-71.
- [7] 黄靖茵,黄康乾,向德军,等.基于电力交易平台大数据的多区域电价预测研究[J].电气应用,2020,39(9):36-41.