极性反转电压下±400 kV换流变压器绕组端部电场特性研究

极性反转电压下，换流变压器的端部电场分布十分复杂。为研究电场的变化，以经典*RC*等效电路建立油纸绝缘模型，根据一台±400 kV换流变压器建立绕组端部电场仿真模型，应用有限元软件ElecNet对换流变压器端部电场进行仿真。仿真结果表明，随着温度的升高线性油和非线性油中的电场强度均增大，而非线性油能够明显降低油中出现的最大电场强度。根据仿真结果，找出绝缘结构的薄弱环节，通过增大静电板厚度和曲率半径两种方式来优化绝缘结构。

李佳欣　刘文里　张士江　荣佳星/哈尔滨理工大学电气与电子工程学院

李佳欣/硕士研究生

关键词/Keywords
极性反转·
换流变压器·
电场特性·
油纸绝缘·

0　引言

换流变压器是直流输电系统中的重要设备之一，其运行的可靠性直接影响电网的稳定[1]。与一般电力变压器不同的是，换流变压器阀侧绕组不仅承受交流电压，还承受直流电压、交直流叠加电压和极性反转电压的作用[2-3]，工程上对换流变压器的绝缘结构要求非常严格。油纸绝缘仍是换流变压器的主要绝缘结构，而油和纸板的非线性使换流变压器端部电场分布十分复杂[4]。因此，研究电场分布，优化变压器绝缘结构，提高输电系统的可靠性，在实际工程上具有重要的意义。

国内外学者对换流变压器油纸绝缘的电场进行了研究。文献[5]测量了油纸绝缘中油隙的电场，但采用的电压等级较低。文献[6]对换流变压器的非线性电场进行了研究，得到换流变压器施加交流、直流和极性反转电压时各部分电场强度，计算结果有一定的误差。文献[7]进行了电场数值计算，但计算结果准确度不高。文献[8]提出了极性反转试验的瞬态电场计算方法，将直流稳态和极性反转取不同的时间步长，对极性反转时间的选取并没有深入研究。

换流变压器在承受极性反转电压时出现故障的概率最高[9]，故本文主要研究极性反转电压下换流变压器电场分布。通过油纸绝缘的*RC*等效电路模型建立数学模型，分析非线性油纸绝缘模型的电场以及油纸绝缘界面空间电荷的变化。以一台ZZDFPZ－405130/500－400实际换流变压器为例建立绕组端部仿真模型，采用加拿大Infolytica公司旗下的ElecNet电场仿真软件进行仿真分析，并根据仿真结果提出优化方案，使换流变压器有足够的绝缘裕度，在运行中有足够的可靠性与稳定性。

1　油纸绝缘模型及电磁场理论

1.1　经典*RC*等效电路模型及数学模型

目前，在双层介质结构时可将其等效成*RC*电路模型，本文研究换流变压器的绝缘结构时将油纸绝缘结构按*RC*电路模型简化，如图1所示。施加电压的瞬间，电压呈容性分布；电场达到稳态时，电压呈阻性分布；最后为极性反转情况。在极性反转完成的瞬间油中出现

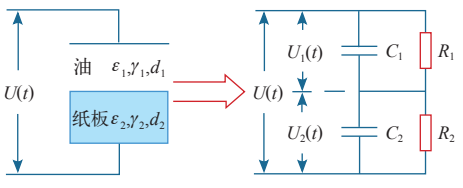


图1　油纸绝缘结构及其等效电路

极高的电场强度，而油的许用场强比绝缘纸板低[10-12]。因此，本文主要研究油中的电场强度变化。

当$t=t_0$（$t_0\to-\infty$）时，对RC等效模型两端施加电压，电压呈容性分布，得到

$$U_1(t_0)=\frac{C_2}{C_1+C_2}(-U_m) \tag{1}$$

当$t=0$时，电压的分布已达到稳态，电压呈阻性分布，得到

$$U_1(0)=\frac{R_1}{R_1+R_2}(-U_m) \tag{2}$$

利用三要素法得出

$$U_1(t)=\frac{-U_mR_1}{R_1+R_2}-U_m\left(\frac{C_2}{C_1+C_2}-\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \tag{3}$$

式中，$\tau=\dfrac{R_1R_2(C_1+C_2)}{R_1+R_2}$。

当$0<t<\Delta T$时，利用双层介质全电流相等的方法求解，得到

$$U_1(t)=\frac{-U_mR_1}{R_1+R_2}+\frac{U_mR_1}{R_1+R_2}\left\{\frac{2t}{\Delta T}+\frac{2(R_2C_2-\tau)}{\Delta T}\times\left[1-\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]\right\} \tag{4}$$

式中，$R_2C_2-\tau=\dfrac{R_2(R_2C_2-R_1C_1)}{R_1+R_2}$。

由于$R_1C_1\ll R_2C_2$，$U_1(t)$由初始值、线性增量和松弛极化增量组成。线性增量为电阻分压响应，松弛极化增量为束缚电荷响应。

当$t>\Delta T$时，继续利用三要素法求解，可得

$$U_1(t)=\frac{R_1U_m}{R_1+R_2}+\left(U_1\Delta T-\frac{R_1U_m}{R_1+R_2}\right)e^{-\frac{t-\Delta T}{\tau}} \tag{5}$$

当$t=\Delta T$时，$U_1(t)$达到最大值，即

$$U_1(\Delta T)=\frac{U_mR_1}{R_1+R_2}\left\{1+\frac{2(R_2C_2-\tau)}{\Delta T}\times\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta T}{\tau}\right)\right]\right\} \tag{6}$$

式中，ΔT、τ的值越大增量越小，并且极性反转后电压达到稳态所用的时间越长。

1.2 空间电荷分析

当$-\infty<t<0$时，油和纸板中的电导电流密度并不相等，在电导率较小的纸板表面积聚了大量电荷，当油纸绝缘的电场达到稳态时，油纸绝缘界面处的电荷量为

$$Q=\int_{-\infty}^{0}\left[\frac{U_1(t)}{R_1}-\frac{U_2(t)}{R_2}\right]dt=-U_m\frac{R_2C_2-R_1C_1}{R_1+R_2} \tag{7}$$

由于$R_1C_1\ll R_2C_2$，因此，在油纸绝缘的分界面处积聚着与极性反转电压相同极性的电荷。假设油纸绝缘系统从$t=0$时开始施加一稳定的直流电压，当$t\to\infty$时，绝缘纸板上$\sigma=E_{2\infty}\varepsilon_0\varepsilon_2$，绝缘纸板中的电流密度远远小于油中的电流密度，因此分界面的电荷可近似等效为油产生的电荷。油中的电流密度经过一个时间常数后减小至稳态。

空间电荷的放电时间一般为几十分钟甚至更长，而极性反转时间仅仅为十几毫秒[13-14]，因此可以认为极性反转的瞬间，空间电荷分布保持不变。在极性反转瞬间，空间电荷在油中与外加电场相互加强，而绝缘纸板中则相互减弱，使油中电场强度增大。油中的电场强度比绝缘纸板中电场强度高。因此，研究油中的电场分布十分必要。

2 实例分析

2.1 非线性参数的选取

我国电力系统运行的换流变压器普遍采用KI50X变压器油。变压器油和绝缘纸板的电导率会受到电场强度和温度的影响，呈现非线性特性。文献[15]进行了大量的试验，得到变压器油和绝缘纸板电导率的变化范围，文献[16]研究了油及绝缘纸板在6 kV/mm电场强度下、不同温度下的电导率，试验测得数据如表1所示。

表1 6 kV/mm时不同温度下两种材料的电导率

温度/℃	20	35	45	55	65
变压器油/10^{-17}(S/m)	55	89	283	591	895
绝缘纸板/10^{-18}(S/m)	64	135	223	368	606

由表1得知，KI50X变压器油的电导率随电场强度或温度升高而上升。对试验数据拟合得到KI50X变压器油及绝缘纸板的电导率的经验公式为

$$\begin{cases}\gamma_{油}(T,E)=k(T)e^{aE}\\ \gamma_{纸}=\gamma_0e^{bE}\end{cases} \tag{8}$$

式中，a可取0.8～1.2，$k(T)=0.036\ 8e^{0.07T}$，$\gamma_0=5.4$，$b=0.017$；T为温度，℃；E为油中电场强度，kV/mm。

考虑到换流变压器的实际工作温度在60～80 ℃之间，本文针对60～80 ℃时，不同电场强度下变压器油的电导率进行数值计算，结果如表2所示。

表2 变压器油的电导率

（单位：10^{-17} S/m）

电场强度(kV/mm)	1	2	3	4	5	6
60 ℃	14.8	33.1	73.5	163.6	364.2	810.5
70 ℃	29.9	66.5	148	329	733	1 632
80 ℃	60.2	133	298	663	1 476	3 287

2.2 变压器参数及仿真模型

以一台ZZDFPZ－405130/500－400换流变压器为例，对阀侧绕组端部进行建模分析，参数如表3所示。

表3 变压器主要参数

主要项目	参数值
额定容量/MV·A	405.13
额定电压/kV	$\frac{530}{\sqrt{3}}\times(1^{+25}_{-5}\times1.25\%)\Big/\frac{171.88}{\sqrt{3}}$
阀侧绕组最大相间交流电压/kV	178.8
每个阀桥最高直流工作电压/kV	204
静电板厚度/mm	40
静电环曲率半径/mm	35

换流变压器绕组端部模型如图2所示。模型主要由调压绕组及静电环、网侧绕组及静电环、阀侧绕组及静电环、绝缘纸板和角环组成，所有间隙的介质均为变压器油。

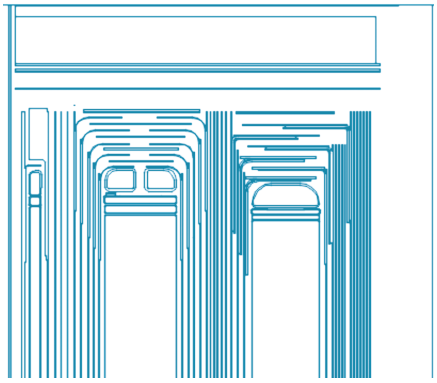


图2 换流变压器绕组端部模型

根据国标GB/T 18494.2计算其极性反转电压为

$$U_{pr}=1.25[(N-0.5)U_{dm}+0.35U_{vm}]=462\ \text{kV} \quad (9)$$

式中，U_{vm}为阀侧绕组最大相间交流工作电压；U_{dm}为每个阀桥最高直流电压；N为从直流线路中性点至与变压器相连的整流桥间所串接的六脉波桥的数量。极性反转电压如图3所示。

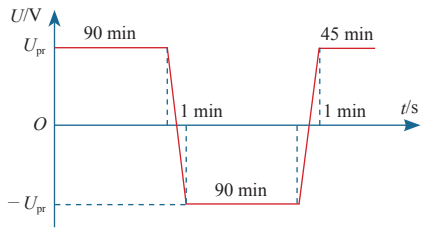


图3 极性反转电压

仿真设置有限元剖分最大尺寸为2 mm，共计剖分118 436个三角形单元。极性反转电压采用瞬态求解中的二阶Newton－Raphson非线性求解器，迭代次数为20次，许用公差为0.1%，材料边缘加密20%。电场仿真共进行6次，具体温度参数设置如表4所示。

表4 换流变压器模型的温度参数

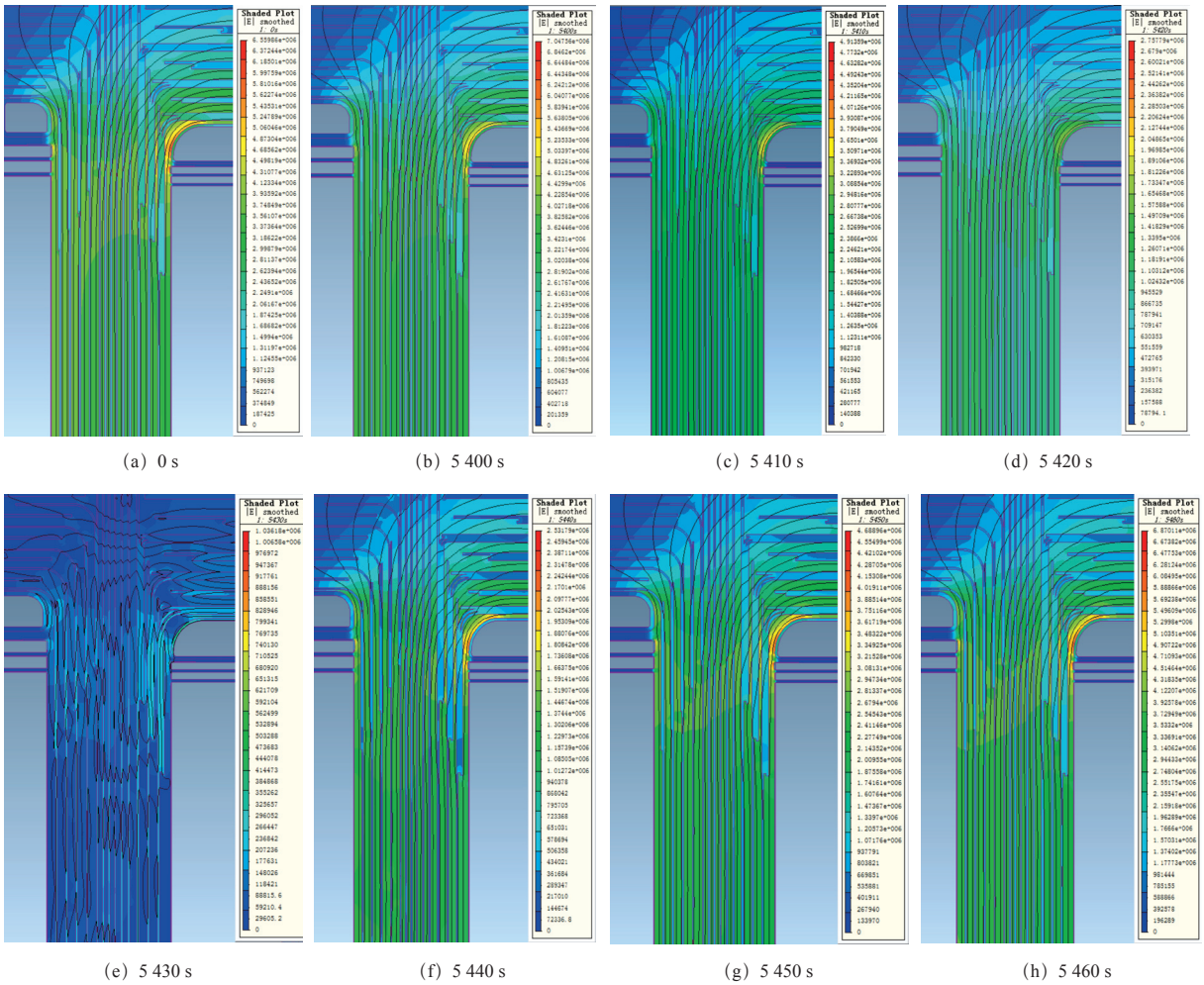
仿真编号	温度/℃	线性/非线性
1	20	线性
2	60	线性
3	70	线性
4	80	线性
5	60	非线性
6	80	非线性

2.3 仿真结果分析

图4为20 ℃时换流变压器主绝缘施加极性反转电压不同时间的电场分布图。0～5 400 s为直流稳态过程。从图4a中可以看出，0 s时，最大电场强度出现在阀侧静电环附近。

为了更加清楚地观察此区域的电场强度变化，将静电环附近区域放大，如图5所示，ab路径上的电场强度变化如图6所示。图4中，油中最大电场强度为5.74 kV/mm，纸板中的最大电场强度为2.53 kV/mm，电场强度沿着远离阀侧静电环方向逐渐降低。

5 400～5 460 s为极性反转过程，此时的电场由



（a）0 s　（b）5 400 s　（c）5 410 s　（d）5 420 s

（e）5 430 s　（f）5 440 s　（g）5 450 s　（h）5 460 s

图4　20 ℃时不同时刻电场分布图

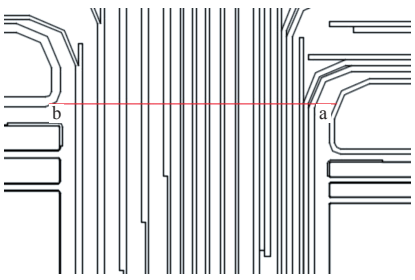


图5　静电环附近局部结构放大图

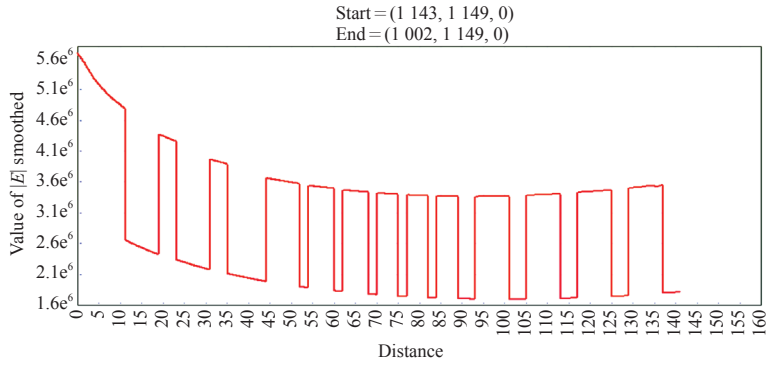


图6　ab路径电场强度变化图

空间电荷及极性反转电压叠加组成，如图4b～h，每一时刻油中的最大电场强度分别为7.04 kV/mm、4.91 kV/mm、2.75 kV/mm、1.03 kV/mm、2.53 kV/mm、4.69 kV/mm和6.87 kV/mm。随着极性反转过程的进行，油中的电场强度先减小后增大。

长时直流电压下变压器油的许用电场强度为10 kV/mm、极性反转电压下变压器油的许用电场强度为13 kV/mm。表5为不同温度时油中出现的最大电场强度。从表5中可以看出，使用线性油时（仿真编号2～4），每一时刻油的电场强度随着

温度的升高而增大，在5 400 s时电场强度变化最大，此时的绝缘裕度分别为1.81、1.35和1.20，而在5 460 s时的电场强度变化相对较小，此时的绝缘裕度为1.28、1.04和1.00。而使用非线性油时（仿真编号5、6），油中的电场强度明显减小，在5 400 s时的绝缘裕度为1.97、1.98，在5 460 s时的绝缘裕度为1.91、1.97。可见非线性油明显比线性油的绝缘裕度大。

表5 不同温度时油中最大电场强度

（单位：kV/mm）

仿真编号	2	3	4	5	6
0 s	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55
5 400 s	7.15	9.88	10.76	6.58	6.56
5 460 s	10.09	12.50	12.97	6.81	6.59
10 860 s	7.42	7.96	8.62	6.82	6.60
10 920 s	8.68	12.13	12.82	6.54	6.68

2.4 绝缘结构的优化分析

换流变压器端部电场十分复杂，研究电场分布的目的在于找出绝缘结构的薄弱点，提出优化方案，以确保换流变压器工作过程当中有足够的绝缘裕度。由以上仿真结果可以看出，80 ℃时极性反转完成后最大电场强度达到12.82 kV/mm，绝缘裕度偏小，仅为1.01。为优化绝缘结构提出以下三种改进方案，并对三种改进方案进行电场仿真，得到变压器油中的最大电场强度，结果如表6所示。

表6 绝缘结构优化方案

方案序号	静电板厚度/曲率半径/mm	油中最大电场强度/(kV/mm)
1	40/38	12.14
2	42/35	11.79
3	42/38	10.40

由表6可以看出，三种优化方案均不同程度地降低了油中的最大电场强度，第三种方案为最佳方案，即同时增大了静电板的厚度和静电环的曲率半径，绝缘裕度达到1.24，采取这种优化方案可使换流变压器有更高的可靠性和稳定性。

3 结束语

以一台±400 kV换流变压器为例，以ElecNet有限元软件为平台，建立了换流变压器端部模型，经多次仿真得出以下结论。

1）在极性反转过程中，变压器油中的电场由空间电荷和极性反转电压叠加组成，最大电场强度先减小后增大。

2）随着温度的升高，线性油和非线性油中的电场强度均增大，而非线性油能够明显降低油中出现的最大电场强度，使绝缘裕度增加。

3）增大静电板的厚度和增加静电环的曲率半径可以有效降低油中的最大电场强度。

参考文献

[1] 赵畹君．高压直流输电工程技术 [M]．北京：中国电力出版社，2004.

[2] Elliott F E，Lavier B E，Kuehn W P，et al．FEM-study on converter transformer failures in the celilo HVDC converter station [C]．IEEE Power Engineerlng Societylciuter Meeting，New York，1999：1047-1052.

[3] Moser H P．Transformerboard II [M]．Switzerland：Zürich，1987.

[4] 李晓辉，李岩，李东雪，等．换流变压器阀侧绕组非线性各向异性直流电场分析 [J]．高压电器，2012，48 (4)：18-22.

[5] Gafver U，Hjortstarn O，Serdyuk Y，et al．Modeling and measurements of electric fields in composite oil/cellulose insulation [C]．IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena，Kansas，American，IEEE，2006：154-157.

[6] Takahashi E，Shirasaka Y，Okuyama K．Analysis of an anisotropic nonlinear electric field with a discussion of dielectric tests for converter transformers and smoothing reactors [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1994，9 (3)：1480-1486.

[7] 吕晓德，陈敦利．极性反转时换流变压器绝缘电场特性研究 [J]．高电压技术，1997，23 (1)：67-68.

(下转第41页)

压也加入为成组指标。

使用层次分析法构建判断矩阵，计算得出容量、欧姆内阻、极化内阻和平台电压的权重比例。使用*K*均值聚类算法作为分组方法对电池进行聚类。最后用实物试验的方法，通过容量利用率评价模组的一致性，验证方法的可行性和有效性。

参考文献

[1] 方海峰，黎宇科，黄永和．电动汽车废旧动力蓄电池的回收利用技术及发展 [J]．汽车与配件，2011 (11)：27-29．

[2] 沈晓彦，黄钟琪，周建新，等．锂电池在风光发电储能系统中的应用分析 [J]．电源技术，2011，35 (5)：602-604．

[3] Gladwin D T，Gould C R，Stone D A，et al．Viability of “second-life” use of electric and hybridelectric vehicle battery packs [C]．Industrial Electronics Society，IECON 2013－39th Annual Conference of the IEEE，2013：1922-1927．

[4] 韩路，贺狄龙．动力电池梯次利用研究进展 [J]．电源技术，2014，38 (3)：548-550．

[5] 孙吉贵，刘杰，赵连宇．聚类算法研究 [J]．软件学报，2008，19 (1)：48-61．

[6] 李腾，林成涛，陈全世．磷酸铁锂电池组成组过程的不一致性分析 [J]．清华大学学报：自然科学版，2012，52 (7)：1001-1006．

[7] 戴海峰，王楠，魏学哲，等．车用动力锂离子电池单体不一致性问题研究综述 [J]．汽车工程，2014，36 (2)：181-188．

[8] QC/T 743—2006 电动汽车用锂离子蓄电池测试规范 [S]．

[9] 陈强，李香龙，李雪，等．单体参数差异对串联电池组性能影响研究 [J]．电源技术，2013，37 (11) 1947-1950．

[10] 李晓明．K-means类型变量加权聚类算法的研究与实现 [D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2006．

[11] 李洁，高新波，焦李成．基于特征加权的模糊聚类新算法 [J]．电子学报，2006，34 (1)：89-92．

[12] 孙宏才，田平，王莲芬．网络层次分析法与决策科学 [M]．北京：国防工业出版社，2011．

（收稿日期：2016－01－25）EA

(上接第36页)

[8] 王冰，王清璞，孙优良．换流变压器阀侧绕组端部极性反转瞬态电场的计算与分析 [J]．变压器，2007，44 (6)：11-22．

[9] Wen K C，Zhou Y B，Fu J，et al．A calculation method and some features of transient field under polarity reversal voltage in HVDC insualtion [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1993，8 (1)：223-230．

[10] 王永红，魏新劳．极性反转电压下油纸复合绝缘的特性 [J]．中国电机工程学报，2012，32 (19)：161-168．

[11] 魏新劳，聂洪岩，陈庆国，等．极性反转电压下油纸绝缘系统中电场分布 [J]．电机与控制学报，2010，14 (11)：27-30．

[12] 丁中尼，李光范．极性反转时典型油纸复合绝缘的电场特性 [J]．电网技术，2008，32 (23)：82-85．

[13] 李季，罗隆福，许加柱，等．换流变压器阀侧绝缘电场特性研究 [J]．高电压技术，2006，32 (9)：121-124．

[14] 李岩，朱立勋．电力变压器主绝缘电场计算与分析软件 [J]．变压器，2013，50 (6)：52-56．

[15] 刘刚，李琳，李文平，等．换流变压器极性反转非线性电场分析 [J]．高电压技术，2012，38 (2)：451-456．

[16] 关健昕．油纸绝缘电导非线性特性对阀侧出线绝缘裕度的影响研究 [D]．北京：中国电力科学研究院，2014．

（收稿日期：2015－11－03）EA