

油气套管连接的变压器绕组变形试验差异分析

陈旭, 王淮宁, 孙立群, 张灿

(国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 油气套管连接的变压器现场绕组变形试验只能通过套管末屏取信号的方式进行。套管末屏以及气体绝缘母线部分的影响导致所得幅频响应曲线与出厂试验、交接试验所得曲线有较大不同。本文采用构建变压器等效模型的方法, 对比套管末屏取信号的现场试验与绕组端部取信号的交接试验所得幅频响应曲线, 从低频率段、中频率段、高频率段的曲线以及幅值的变化方面分析两者的差异及产生原理, 得出两者曲线不宜纵向对比的结论, 并为现场试验提出相关建议。

关键词: 油气套管连接; 变压器; 绕组变形; 幅频响应

中图分类号: TM411

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0070-06

0 引言

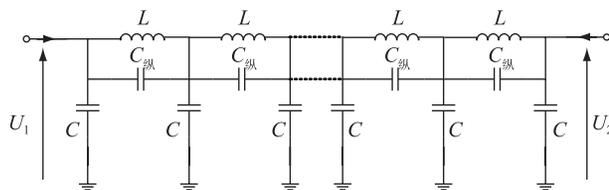
随着城市变电站紧凑化集约化的发展, 油气套管连接的变压器在 220 kV 及以上城市变电站中的应用越来越普遍。变压器通过油气套管与气体绝缘组合电器设备 (gas insulate switchgear, GIS) 连接, 与常规变压器不同的是, 变压器与 GIS 之间无导电部分引出, 现场例行试验时不便拆除对应套管, 变压器绕组变形试验接线也随之改变, 只能通过套管末屏取信号的方式进行^[1]。同时, 由于引入的套管末屏及相连气体绝缘母线 (gas insulate line, GIL) 的影响, 现场试验与出厂试验所得幅频响应曲线有较大不同, 也与现场交接试验在绕组端部取信号所得曲线有一定的差异。目前研究着重于通过绕组变形试验对故障的分析、判断^[2-6], 忽略了获取绕组变形试验原始幅频响应曲线的准确性。本文通过对比油气套管连接的变压器套管末屏取信号和绕组端部取信号两种试验方法, 对差异的产生原因进行理论分析, 并为油气套管连接的变压器的交接工作提供相应的建议。

1 绕组变形试验原理分析

66 kV 及以上电压等级变压器的绕组变形试验宜采用频率响应法测量绕组特征图谱^[7,8]。本文所指绕组变形试验均采用频率响应法进行。

频率响应法通过在绕组激励端输入 1~1000 kHz 的正弦电压波, 按频率线性采样, 在系统中描绘出变压器绕组的幅频特性曲线。根据相关系数 R 以及幅频响应曲线中的波峰或波谷分布位置及数量变化, 作为判断变压器绕组变形的依据。在 1~

1000 kHz 的交流电源作用下, 变压器绕组电阻远小于变压器的容抗、感抗, 故变压器绕组可以等效为多个电容和电感组成的无源二端口网络, 如图 1 所示^[9-11]。



U_1 为激励电压; U_2 为响应电压;

L 为绕组电感均数; $C_{纵}$ 为纵向电容; C 为绕组对地电容

图 1 变压器绕组等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of transformer winding

测得的幅频响应曲线常用对数形式表示:

$$H(f) = 20 \log [U_2(f)/U_1(f)] \quad (1)$$

式中: $H(f)$ 为 f 传递函数的模 $|H(j\omega)|$; $U_1(f)$, $U_2(f)$ 为激励端和响应端电压的峰值或有效值 $|U_1(j\omega)|$ 和 $|U_2(j\omega)|$ 。

频率较低时, 电路中容抗大于感抗, 电路呈感性; 频率较高时, 容抗小于感抗, 电路呈容性。随着频率的变化, 各个分支电路中的电容和电感在某一频率下产生谐振, 从而令输出电压产生波动, 在频谱图上呈波峰、波谷交替的图像。频谱图的波峰波谷分布情况与变压器绕组的结构有关, 变压器绕组频率响应实际上就是根据特定变压器绕组频谱图的波峰波谷分布对比来判断变压器绕组变形的情况^[12,13]。典型幅频响应曲线中包含多个波峰波谷的变化, 根据文献[1]将幅频响应曲线分为低频段 (1~100 kHz)、中频段 (100~600 kHz)、高频段 (>600 kHz) 进行分析, 并以相关系数 R 来辅助判断变压器绕组变形情况。

变压器绕组变形试验属于非定量试验,相关系数的大小和范围只能作为参考依据,根据波峰波谷分布位置判断方法受试验人员的技术水平和经验影响较大,故不能作为确定绕组变形的唯一试验,发现有绕组变形可能时,还要结合油色谱分析试验、短路阻抗试验、变压器各绕组电容量试验进一步进行分析判断,综合判断绕组变形程度制定相应的检修策略^[14]。

2 绕组变形试验方法差异分析

油气套管连接的变压器绕组变形试验关键在于变压器与 GIS 之间无导电部分引出,导致现场预防性试验时拆除套管不便,只能通过套管末屏取信号的方式进行绕组变形试验,接线方式如图 2 所示。而变压器出厂试验以及投运前变压器的交接试验,均为在油气套管未安装时通过绕组引出线取信号方式进行的绕组变形试验,接线方式如图 3 所示。

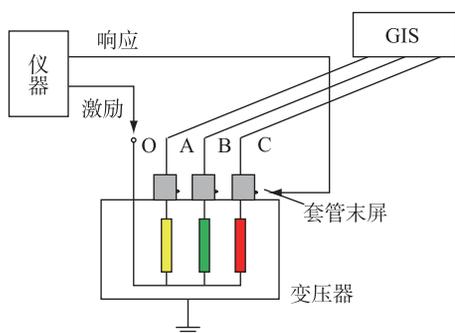


图 2 套管末屏取信号绕组变形试验接线
Fig.2 Winding deformation test signal wiring from the bottom shielding of bushing

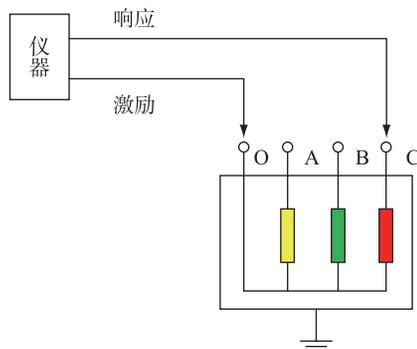


图 3 绕组引出线取信号绕组变形试验接线
Fig.3 Winding deformation test signal wiring from the winding

可见,套管末屏取信号的绕组变形试验额外引入了套管末屏以及 GIS 部分对地电容的影响,故两者得到的幅频响应曲线也有较大的差别,如图 4 所示。本文主要针对两者幅频响应曲线差异的原理进行分析。

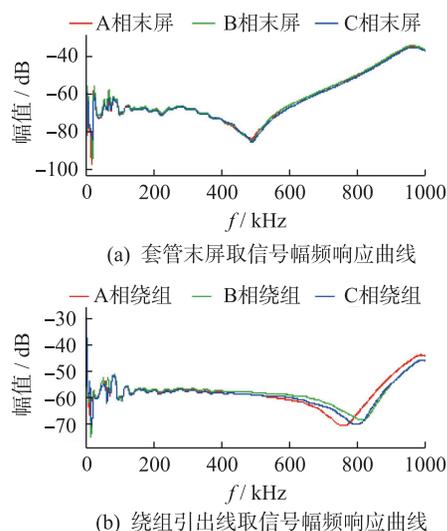


图 4 套管末屏取信号与绕组引出线取信号幅频响应曲线示例

Fig.4 The sample of amplitude frequency response curve which signal from the bottom shielding of bushing and the winding

3 幅频响应曲线差异分析

在套管末屏取信号,等效在响应端并联引出线及 GIS 对地电容 $C_{\Sigma 0}$,串联套管电容 C_T ,并联末屏对地电容 C_{T0} ,其电路如图 5 所示。图 5 中 (a) 为变压器绕组引出线取信号的等效模型, (b) 为套管末屏取信号的等效模型, (c) 为并联引出线及 GIS 对地电容。由于引出线及 GIS 对地电容远小于变压器对地等效电容,故 (c) 部分影响可忽略不计。

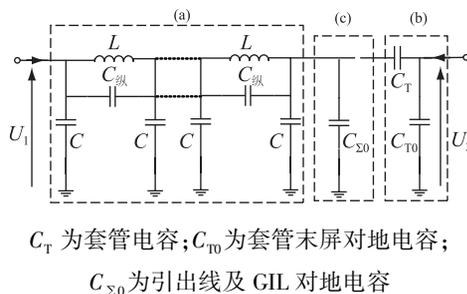


图 5 油气套管连接的变压器频率响应法等效电路
Fig.5 Oil-gas bushing connection of transformer equivalent circuit frequency response method

幅频响应曲线中的波峰和波谷点本质是不同频率下,绕组电感、饼间和匝间电容、绕组对地电容发生谐振的结果,其中峰点对应发生串联谐振,谷点对应发生并联谐振^[15, 16]。

3.1 波峰波谷分布位置变化原理分析

3.1.1 低频率段

在低率频段,绕组阻抗特性主要变现为感性,由于绕组的饼间电容和匝间电容远大于绕组对地

电容,绕组套管电容 C_T 远大于套管末屏对地电容 C_{T0} ,故等值电路中的阻抗特性主要由纵向电容 $C_{纵}$ 、套管电容 C_T 和绕组电感决定,绕组对地电容 C 和套管末屏对地电容 C_{T0} 影响可忽略。绕组阻抗整体表现为感性,幅频响应曲线中的波峰波谷点对应发生谐振的频率点。设在绕组引出线取信号模型发生谐振的频率为 $f_1, f_2 \dots f_i$,而在套管末屏取信号模型发生谐振的频率为 $f'_1, f'_2 \dots f'_i$ 。则在对应的谐振点有:

$$\begin{cases} f_i = 1/2\pi\sqrt{L_i C_i} \\ f'_i = 1/2\pi\sqrt{L'_i C'_i} \end{cases} \quad (2)$$

在套管末屏取信号模型等效于在绕组引出线取信号模型串联套管电容 C_T ,变压器绕组分部电感不变,即: $L_i \approx L'_i, C_i > C'_i$,可推出 $f_i < f'_i$ 。即在低频率段,套管末屏取信号的幅频响应曲线波峰波谷的频率要高于在绕组引出线取信号曲线的频率。

3.1.2 中频率段

在中频率段,随着频率上升,绕组阻抗特性不再为纯感性,而是由绕组各个部分分布电感、匝间电容、饼间电容和分布电容的相互作用,阻抗特性呈感性、容性交替情况,故在该频段呈现较多的波峰波谷分布。图 5 中的 (a) 部分各个分支电路发生串联谐振或并联谐振,造成绕组阻抗特性,串联谐振时表现为波峰,并联谐振时变现为波谷。此时,图 5(b) 部分串联的套管电容 C_T 和并联的末屏对地电容 C_{T0} 等效为图 5(a) 部分新增的分支电路,会影响某个波峰波谷点,但大部分的波峰波谷点仍由图 5(a) 中的各分支电路决定,故该频段两者波峰波谷的频率分布点表现为基本一致。

3.1.3 高频率段

在高频率段,随着频率上升,感抗增大,容抗减小,绕组阻抗特性表现为容性。此时,由于绕组饼间电容、匝间电容(如图 5 中的 $C_{纵}$) 远大于绕组分布电容 C ,套管电容 C_T 远大于套管分布电容 C_{T0} ,故绕组饼间电容、匝间电容、套管电容 C_T 的容抗相对于对地电容容抗较小,图 5(b) 串联的套管电容 C_T 的影响可以忽略,以并联的末屏对地电容 C_{T0} 影响为主。设在绕组引出线取信号模型发生谐振的频率为 $f_1, f_2 \dots f_i$,而在套管末屏取信号模型发生谐振的频率为 $f''_1, f''_2 \dots f''_i$ 。则在对应的谐振点有:

$$\begin{cases} f_i = 1/2\pi\sqrt{L_i C_i} \\ f''_i = 1/2\pi\sqrt{L'_i C''_i} \end{cases} \quad (3)$$

在套管末屏取信号模型等效于在绕组引出线取信号出并联套管电容 C_{T0} ,变压器绕组分部电感

不变,即: $L_i = L'_i, C_i < C''_i$,可推出 $f_i > f''_i$ 。即高频段,套管末屏取信号的幅频响应曲线波峰波谷的频率要低于绕组引出线取信号曲线的频率。

3.1.4 两者频率响应曲线验证

本文选取型号为 OSSZ11-180000/220,联结组别 YNa0d11 的变压器高压绕组 A 相,使用 TDT5 变压器绕组变形测试仪,对分别采用绕组引出线取信号方法和套管末屏取信号方法获取的幅频响应曲线进行对比。

低频率段,如图 6 所示。绕组引出线取信号的幅频响应曲线与套管末屏取信号的幅频响应曲线在 10~50 kHz 频段有较大差异,但前者波峰波谷发生的频率要低于后者,与上述推论一致。

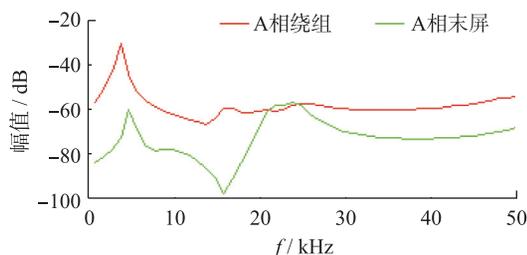


图 6 低频率段幅频响应曲线对比

Fig.6 Low frequency amplitude frequency response curve contrast figure

中频率段,如图 7 所示。绕组引出线取信号的幅频响应曲线与套管末屏取信号的幅频响应曲线在中频段 50~400 kHz 内波峰波谷的频率分布基本保持一致,仅在 50~60 kHz 频段内,后者比前者多了一个波峰和一个波谷,60~400 kHz 频段内波峰波谷的频率分布基本保持一致,与上述推论一致。

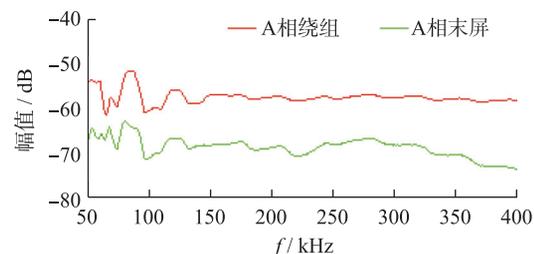


图 7 中频率段幅频响应曲线对比

Fig.7 Medium amplitude frequency response curve contrast figure

高频率段,如图 8 所示,绕组引出线取信号的幅频响应曲线相对套管末屏取信号的幅频响应曲线呈滞后性,后者波谷频率位置为 485 kHz,而前者波谷频率位置为 760 kHz,且后者多呈现出一个波峰,前者还未完全展现,后者波峰波谷频率低于前者,与上述推论一致。

3.2 幅值变化原理分析

绕组引出线取信号幅频响应曲线与套管末屏

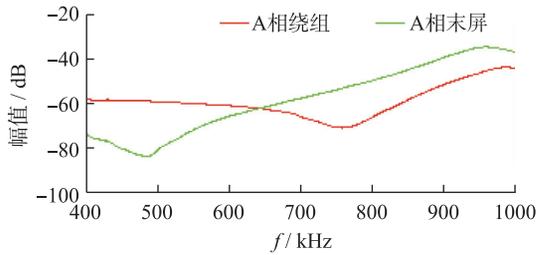
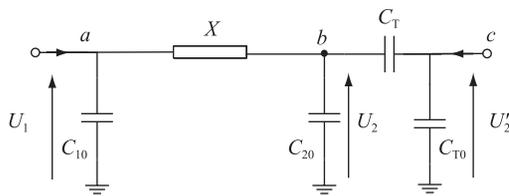


图8 高频率段幅频响应曲线对比

Fig.8 High frequency amplitude frequency response curve contrast figure

接线幅频响应曲线的幅值变化按照绕组整体阻抗特性进行分析,可将变压器绕组等值电路等效为 Π 型电路,如图9所示, $a-b$ 部分为变压器绕组等值电路,反映绕组引出线取信号的测试回路,频率响应幅值为式(1)所示, $b-c$ 部分为等效套管末屏接入电路, $a-c$ 反映套管末屏接线的测试回路,频率响应幅值为式(4)所示:

$$H'(f) = 20 \log [U'_2(f)/U_1(f)] \quad (4)$$



C_{10} 为等效对地电容; X 为等效阻抗; C_{20} 为等效对地电容

图9 幅值等效电路

Fig.9 Amplitude equivalent circuit

根据电路图可得:

$$\frac{U'_2}{U_2} = \frac{X_{CT0}}{X_{CT} + X_{CT0}} \quad (5)$$

即套管电容 C_T 与套管对地电容 C_{T0} 等效为电容分压器,分压比 K 为:

$$K = \frac{U'_2}{U_2} = \frac{X_{CT0}}{X_{CT} + X_{CT0}} < 1 \quad (6)$$

可得:

$$H'(f) = H(f) + 20 \log K \quad (7)$$

$20 \log K < 0$, 故 $H'(f) < H(f)$ 。即原理上分析,套管末屏接线幅频响应曲线幅值要小于绕组引出线取信号幅频响应曲线。

套管末屏接线幅频响应曲线与绕组引出线取信号幅频响应曲线幅值对比如图10所示。由图10可看出,在 $10 \sim 50$ kHz 前者除了部分波峰波谷值差异外,基本小于后者,这是因为低频段串联套管电容 C_T 的影响,谐振点的整体偏移,电路参数发生变化所致; $50 \sim 400$ Hz 前者较后者幅值整体小 10 dB 左右。由于该频段谐振点分布主要由变压器绕组

参数影响,受套管影响较小,故电路参数基本一致,符合上述模型; $400 \sim 1000$ Hz 由于套管对地电容影响,使谐振点整体前移,使得前者幅值超前于后者,但相应波峰波谷点的幅值依然是前者小于后者。可得出结论,套管末屏接信号的幅频响应曲线与绕组引出线取信号幅频响应曲线的幅值与在相对应的波峰波谷点呈前者小于后者的趋势^[17]。

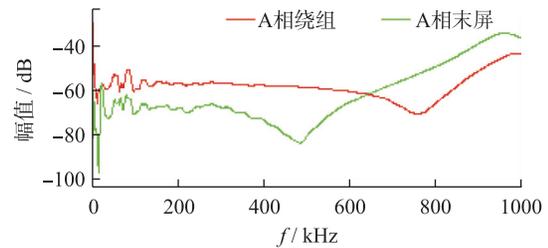


图10 频率响应幅值对比

Fig.10 Frequency response amplitude comparison chart

综上所述,油气套管连接变压器绕组变形试验,采用套管末屏取信号的现场试验方法,相对于采用绕组引出线取信号的出厂试验及交接试验,所得幅频响应曲线在波峰波谷的频率分布以及幅值大小上均有所不同,表现为:

(1) 波峰波谷分布的频率分布。前者相对后者低频段频率提高,且差异比较明显;中频段两者比较一致,前者可能多出少量波峰波谷;高频段频率降低。

(2) 幅值分布。在相对应的波峰波谷点,前者小于后者。

4 相关建议

频率响应法判断绕组变形基于比较的方法,通过频率响应曲线横比(相间对比)和纵比(与历史曲线对比),结合相关系数 R 进行判断。然而,由于高频段受对地杂散电容影响较大,变压器幅频响应曲线对比主要以低频段为主,中高频段为辅。根据分析,套管末屏取信号的试验方法与绕组引出线取信号的试验方法所得的幅频响应曲线不具有可对比性,故现场试验中与出厂试验曲线对比的纵向比较法难以判断变压器是否存在绕组变形。

为保证绕组变形试验的有效性,本文提出以下建议:

(1) 绕组变形试验应保证与试验前后接线方式一致。现场交接试验时应在变压器安装后、与 GIS 连接前先进行绕组引出线取信号的绕组变形试验,与出厂试验报告对比无异常;变压器与 GIS 连接后,套管末屏接线的绕组变形试验结果作为原始数据保存,后期试验要和变压器与 GIS 连接后试验方法

保持一致,并尽可能选择同样型号的试验仪器;

(2) 对仅有出厂试验报告,无 GIS 套管安装后幅频响应曲线的,以横向对比法分析同电压等级的三相绕组幅频响应曲线为主,出厂试验的幅频响应曲线参照意义不大;

(3) 套管末屏接线的变压器绕组变形试验方法除了与变压器绕组变形情况有关,同时受套管电容的影响。需结合套管介损和电容量试验排除套管电容变化的干扰。

(4) 对于高压绕组的绕组变形试验,还受到有载调压开关装置的影响,应增加有载分接开关试验、绕组直流电阻试验排除有载分接开关接触不良引起的误差。

(5) 绕组变形试验应排除现场试验人员接线和试验设备运行状态的影响。试验引线断线、变压器铁心未接地、试验仪器接地不良、通过电缆或者变压器套管末屏接信号线等都会对试验结果造成较大干扰,影响试验结果判断。

5 结语

由于套管电容的影响,变压器套管末屏处取信号绕组变形试验所获频率响应曲线与绕组端部取信号绕组变形试验所获曲线无论是波峰波谷的频率分布还是幅值大小都有较大差别,造成油气套管连接的变压器现场试验与出厂试验所获频率响应曲线的纵向对比分析不具有可比性。为保证试验的有效性,应根据接线方式的不同,慎重采用纵向对比分析法,并充分考虑套管电容给绕组变形试验造成的影响,避免造成误判。

参考文献:

- [1] DL/T 911—2016 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S].
DL/T 911—2016 Frequency response analysis method of power transformer winding deformation[S].
- [2] 梁博渊,刘宏亮. 变压器绕组变形的综合诊断分析[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(1):16-19.
LIANG Boyuan, LIU Hongliang. Comprehensive diagnosis of transformer winding deformation analysis [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30 (1): 16-19.
- [3] 柯于刚,顾文雯. 220 kV 主变短路故障后的综合试验分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2):21-23.
KE Yugang, GU Wenwen. The comprehensive test after 220 kV main transformer short-circuit fault analysis [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015(2): 21-23.
- [4] 华德峰,卞超,甘强. 一起 220 kV 变压器绕组变形故障分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2):15-17.
HUA Defeng, BIAN Chao, GAN Qiang. With 220 kV transformer winding deformation failure analysis [J]. Jiangsu Electric

- cal Engineering, 2015,34(2): 15-17.
- [5] 陈巧勇,任红,罗平. 电力变压器绕组变形的综合诊断法[J]. 高压电器, 2011, 47(7):50-53.
CHEN Qiaoyong, REN Hong, LUO ping. Comprehensive diagnosis of power transformer winding deformation [J]. High Voltage Electric Equipment, 2011, 47 (7): 50-53.
- [6] 张琛. 变压器绕组变形测试方法及应用[J]. 变压器, 2007, 44(2):35-37.
ZHANG Chen. Transformer winding deformation test method and its application [J]. Journal of Transformer, 2007, 44 (2): 35 to 37.
- [7] 滕国军,牛林. 变压器试验与分析[M]. 北京:中国电力出版社,2013:26-26.
TENG Guojun, NIU Lin. Transformer test and analysis [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 26-26.
- [8] GB 50150—2006 电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S].
GB 50150—2016 Electrical equipment installation project electrical equipment commissioning test standards[S].
- [9] 舒乃秋,武剑利,王晓琪. 频率响应分析法检测电力变压器绕组变形的理论研究[J]. 变压器, 2005, 43(10):23-26.
SHU NaiQiu, WU Jianli, WANG Xiaoqi. The frequency response analysis, the detection of power transformer winding deformation theory to study [J]. Journal of Transformer, 2005, 43(10): 23-26.
- [10] 龙凯华,杨海超,马继先,等. 电力变压器绕组变形诊断有效性研究[J]. 变压器, 2013, 50(9):54-57.
LONG Kaihua, YANG Haichao, MA Jixian, et al. Power transformer winding deformation diagnosis effectiveness research [J]. Journal of Transformer, 2013,50(9): 54-57.
- [11] 李晨,李强,孙昭昌,等. 变压器绕组变形的影响因素及出口短路后分析[J]. 变压器, 2013, 50(8):66-70.
LI Chen, LI Qiang, SUN Zhaochang. The influence factors of transformer winding deformation and export after short circuit analysis [J]. Journal of Transformer, 2013, 50 (8): 66-70.
- [12] 孙翔,何文林,詹江杨. 电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4):1207-1220.
SUN Xiang, HE Wenlin, ZHAN Jiangyang. The present status of power transformer winding deformation detection and diagnosis technology and development [J]. High Voltage Technology, 2016, 42(4): 1207-1220.
- [13] 岂小梅. 变压器绕组变形的综合判断及经验总结[J]. 电网技术, 2006(S1):220-222.
QI Xiaomei. Comprehensive judgment and experience summary of transformer winding deformation [J]. Journal of Grid Technology, 2006(S1):220-222.
- [14] 勇明,黄芬. 变压器绕组变形检测和诊断方法论述[C]//2009年中国电机工程学会年会论文集.天津:2009:27-30.
YONG Ming, HUANG Fen. Transformer winding deformation detection and diagnosis method discussion [C]// 2009 Proceedings of Chinese Society for Electrical Engineering. Tianjin: 2009:27-30.

(下转第 85 页)

Research on GW Level Remote HVDC Based on MgB₂ HTS Superconductor

WANG Yingjie¹, YANG Bo², ZUO Huifang², QI Dongqian³

(1. Sustainable Energy Research Institute of CUMT, Xuzhou 221008, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, China;

3. Dianguang Explosion Technology Company, Wenzhou 325600, China)

Abstract: The research aims at exploring the possibility of GW level remote HVDC through a new type of superconducting material (MgB₂) as a cost-effective and environmental-friendly DC line and liquid hydrogen as coolant. The necessity and advantages of superconducting DC transmission are analyzed firstly. Then basic method of HVDC converter is explained. The MgB₂ superconducting cables and liquid hydrogen refrigeration system are introduced and the DC transmission control strategy based on twelve pulse converter is illustrated. Through the Pscad software, the simulation of superconducting DC transmission is completed and the line power losses between the MgB₂ HTS superconducting cable and traditional cable under the same condition are compared, which proves the advantages of low loss and unlimited capacity and provides the preliminary basis for the development of MgB₂ HTS superconductor in the field of superconducting DC transmission.

Key words: GW level remote HVDC; superconducting DC transmission; MgB₂; twelve pulse converter.

(编辑 徐林菊)

(上接第74页)

[15] 吴晓东,魏泽民. 影响变压器频率响应测试结果的因素分析[J]. 电力设备,2004,5(10):60-63.

WU Xiaodong, WEI Zemin. The influencing factors of transformer frequency response test results analysis [J]. Electric Power Equipment, 2004, 5 (10): 60-63.

[16] 朱明林,金之俭,朱子述. 变压器绕组变形诊断中的等效模型参数辨识[J]. 电力系统自动化,2001,25(8):38-41.

ZHU Minglin, JIN Zhijian, ZHU Zishu. The diagnosis of transformer winding deformation parameter identification of equivalent model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (8): 38-41.

[17] 包玉树. 变压器绕组变形检测技术在江苏电网的应用[J]. 江苏电机工程,2005,24(4):49-51.

BAO Yushu. The application of transformer winding deformation detection technology in jiangsu power grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24 (4): 49-51.

作者简介:



陈旭

陈旭(1990—),男,河南舞钢人,工程师,从事电气试验工作(E-mail: 469367601@qq.com);

王淮南(1976—),男,江苏南京人,技师,从事电气试验工作;

孙立群(1968—),男,江苏南京人,高级技师,从事电气试验工作;

张灿(1989—),男,江苏沛县人,助理工

程师,从事电气试验工作。

Difference Analysis of Oil-gas Bushing-connected Transformer Winding Deformation Test

CHEN Xu, WANG Huaining, SUN Liqun, ZHANG Can

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 210000, China)

Abstract: The field winding deformation test of the transformer with oil and gas bushing connected can be processed only by acquiring signals at the bushing tap. The influence of the bushing tap and the gas insulated line section makes the amplitude-frequency response curves different from the factory test and commissioning test. The method of constructing equivalent model of transformer is adopted, and the amplitude-frequency response curves of the field test at the bushing tap signal and the commissioning test at the winding end signal are compared. Differences and production principles are analyzed from the curve variation and amplitude variation of low frequency segments, medium frequency segments and high frequency segments. It's concluded that the curves should not be contrasted vertically, and suggestions for on-site tests are given.

Key words: oil-gas bushing connection; transformer; winding deformation test; amplitude-frequency response

(编辑 刘晓燕)