

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.027

基于多台不同变压器的直流偏磁抑制措施研究

王渝红¹, 欧林², 张超¹, 李兴源¹, 张功望³, 杨东斌³

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;

3. 国网陕西省电力公司检修公司, 西安 710065)

摘要: 笔者以变电站与换流站合并建站作为站内有多台不同变压器的典型情况。在存在偏磁电流的情况下, 详细计算了偏磁电流在各台变压器中性点分布情况, 计算得到主变中性点偏磁电流约为换流变中性点偏磁电流的 2 倍。提出仅对交流主变采用相应的抑制措施来抑制整个变电站的直流偏磁。最后, 文中以某实际直流工程为基础, 搭建了详细的电磁暂态模型, 通过仿真计算得到: 仅对偏磁电流较大的主变采用抑制措施时, 能有效的抑制整个站偏磁现象。综合考虑多种影响因素, 选择仅在主变中性点采用串电容的方法来抑制直流偏磁。

关键词: 直流偏磁; 偏磁电流; 抑制措施; 变压器中性点; 电磁暂态

Study on DC Bias Suppression Measures Based on Multiple Different Transformers

WANG Yuhong¹, OU Lin², ZHANG Chao¹, LI Xingyuan¹, ZHANG Gongwang³, YANG Dongbin³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Co., Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Corporation Maintenance Company, Xi'an 710065, China)

Abstract: In this paper, a substation which contains AC transformers and converter transformers is treated as typical example that a substation contains multiple different transformers. In the case of the presence of the bias current, DC bias current in every transformer neutral point distribution is calculated in detail, in which the DC bias current in AC transformers' neutral point is about 2 times of the DC bias current in converter transformers' neutral point. The main DC bias suppression measures are briefly introduced, the corresponding suppression measures are applied only to AC transformers which is used to suppress the DC bias in the entire substation. Finally, this paper takes a practical DC project as basis to build in a detailed electromagnetic transient model. The following results can be obtained through simulation: the corresponding suppression measures are only applied to AC transformers can effectively inhibit the DC bias in the entire substation. Considering the variety of factors, the method of connecting series capacitor in the AC transformers' neutral point is chosen to suppress the DC bias in the entire substation.

Key words: DC bias; bias current; suppression measures; transformer neutral point; electromagnetic transient

0 引言

特高压交直流电网将作为坚强智能电网的骨干网架而得到快速发展, 未来将建成“五纵五横”特高压交流骨干网架和 27 条特高压直流工程^[1]。各直流接地极附近变电站检测到较大的偏磁电流流过。

2014 年 5 月某省特高压直流在单极满负荷运行时(入地电流 5 000 A), 附近中性点偏磁电流大于 200 A 的变电站 3 座, 100~200 A 之间的变电站 2 座, 20~100 A 多达 19 座。而目前, 包括±500 kV 直流输电工程中深圳换流站、宝安换流站和宝鸡换流站以及±800 kV 直流输电工程的穗东换流站都是采用直流换流站与交流变电站合建的模式^[2], 偏磁电流的

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-05-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB228204)。

Project Supported by National Program on Key Basic Research Project of China(2013CB228204).

分布及其抑制措施就变得更为复杂。

在变电站与换流站合并建站等情况下,同一站内有多台不同型号的变压器,且距离直流感地极相对较近。变电站/换流站中的特高压自耦变压器和换流变压器可能流过较大的偏磁电流,且主变对偏磁直流电流的承受能力较小,极易发生直流偏磁^[3-4]。因此,交流主变与换流变的直流偏磁现象研究需要引起足够的重视。目前,对由直流输电系统引起的变压器直流偏磁现象的研究中。文[3-4]针对德宝直流系统,计算了德宝直流单极大地回来运行时,流过宝鸡站 750 kV 自耦变压器中性点直流电流;文[5-6]计算了系统中特高压直流输电系统单极大地运行时,流过接地极附近变压器中性点偏磁电流的大小;直流不同运行方式下,附近变压器接地点电位的变化情况;文[7-8]详细研究了变压器直流偏磁的基本原理及其对交直流系统的影响;有学者对直流偏磁的抑制措施及原理进行较为深入的研究,其主要的抑制方法有:变压器中性点反向电流法、串联电容法、串联电阻法、串联阻容法等方法^[8-13]。文[8-11]变压器中性点串电容、串电阻以及串电阻容的方法来抑制电力变压器直流偏磁,这些方法能起到较好的抑制效果,但会影响电力变压器可靠接地,同时会导致谐振现象;文[10,12]使用注入方向电流法来抑制直流偏磁,尽管其抑制效果较为明显,但其投资较大、实施较困难。

以上研究多针对单台变压器或多台同一类型的变压器,并不能直接应用含有多台不同参数、型号的变电站。文中根据以上研究,总结多种直流偏磁抑制措施的优缺点。同时,考虑目前相对常见的变电站与换流站合并建站的典型情况,推导流过各个变压器中性点偏磁电流的大小,为采用相应的抑制措施流的分布情况,以某实际直流工程为例,搭建直流系统详细电磁暂态模型,建立各电压等级的等值系统以及交流变电站和直流换流站详细模型;计算各变压器中性点偏磁电流的大小,并选择适合多台变压器直流偏磁的抑制措施提供技术条件。结合各抑制措施优缺点及偏磁电流的分布选择最佳的抑制措施。

1 多台不同变压器中性点偏磁电流的分布

1.1 多台不同变压器典型结构及接线方式

文中以较为典型的变电站与换流站合并建站的情况作为研究对象。在这样的情况下,交流变电站中都选用两台及两台以上的交流主变压器,单独运行时能提供高压交流变电站 70% 的变电容量。中

国目前的直流输电工程中多采用双极十二脉动,其换流变压器一般为 4 台,另有 1 台变压器备用,其基本接线方式为 Y_0-Y 和 $Y_0-\Delta$ 接线^[13]。其基本结构示意图见图 1。

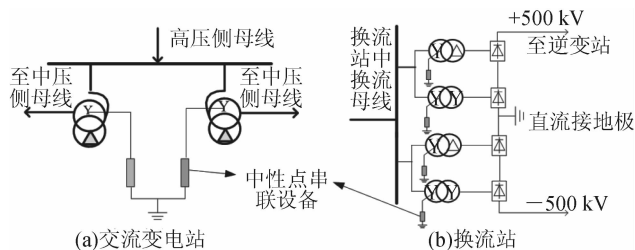


图 1 多台不同变压器接地网示意图

Fig. 1 The grounding grid schematic of multiple different transformers

图 1 中交流主变压器由单相自耦变压器组合而成,变压器由高压侧供电,中压侧功率送出,低压绕组为 Δ 接法,主要为变电站提供无功补偿用于稳定交流电压。换流变电站中运行中的变压器其主要接线方式为: Y_0-Y 和 $Y_0-\Delta$, 阀侧相角相差 30° , 换流母线侧的 Y_0 接线与高压交流母线接地网一起统一接地,阀侧绕组不接地。

1.2 各变压器中性点偏磁电流计算

图 1 所示的多台不同变压器的变电站中,交流主变采用型号、参数完全相同的变压器并联运行,故可以等效为 1 台变压器进行计算。考虑变电站其他送出情况,可整体等效成见图 2。

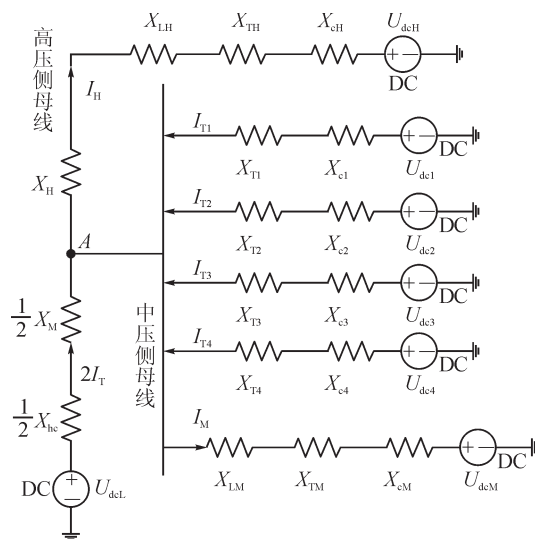


图 2 偏磁电流通路示意图

Fig. 2 The passageway schematic of bias current

图 2 中: A 点为高压交流自耦变压器的高中压分节点; X_H 、 X_M 分别为交流主变压器高压侧绕组偏磁电流通路阻抗、中压侧偏磁电流通路阻抗; X_{T1} 、 X_{T2} 、 X_{T3} 、 X_{T4} 分别为换流变压器偏磁电流通路阻抗; X_{c1} 、 X_{c2} 、 X_{c3} 、 X_{c4} 、 X_{bc} 分别为换流变压器地阻抗和交流主

变压器接地阻抗; X_{LH} 、 X_{TH} 、 X_{CH} 、 U_{dcH} 、 X_{LM} 、 X_{TM} 、 X_{CM} 、 U_{dcM} 分别为高压侧、中压侧输电线路阻抗、变压器阻抗、变压器接地阻抗; I_H 、 I_M 、 I_T 、 I_{T1} 、 I_{T2} 、 I_{T3} 、 I_{T4} 分别为流过高压母线、中压母线, 以及流过交流主变压器和各个换流变压器中性点的偏磁电流。

在同一变电站/换流站中, 采用同一的接地网, 各变压器接地点电位一致, 由图 1、2 可得出

$$\begin{cases} U_3 = U_{dc1} = U_{dc2} = U_{dc3} = U_{dc4} \\ 2I_T + I_{T1} + I_{T2} + I_{T3} + I_{T4} = I_H + I_M \end{cases} \quad (1)$$

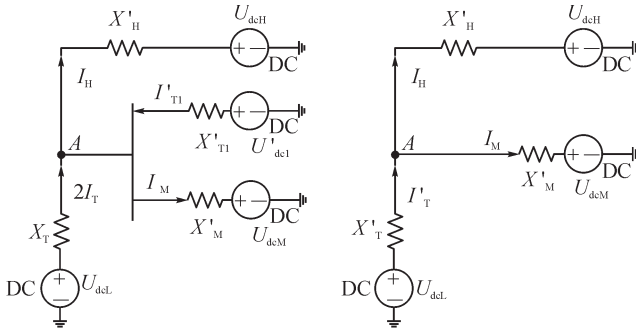
换流变压器接地部分参数一致并采用同一接地网, 同主变接线没有直接的联系, 因此有

$$I_{T1} = I_{T2} = I_{T3} = I_{T4} \quad (2)$$

由此可以将图 2 简化为图 3 所示, 图 3 中各参数分别为:

$$\begin{cases} X'_H = X_{LH} + X_{TH} + X_{CH} \\ X'_M = X_{LM} + X_{TM} + X_{CM} \\ X_T = \frac{1}{2}(X_m + X_{hc}) \\ X'_{T1} = \frac{1}{2}(X_{T1} + X_{c1}) \\ X'_T = X'_{T1} // X_T \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I'_{T1} = 4I_{T1} \\ I'_T = 2I_T + I'_{T1} \end{cases} \quad (4)$$



(a)示意图1 (b)示意图2

图 3 偏磁电流回路简化示意图

Fig. 3 The simplified passageway schematic of bias current

以图 3(b)为基础分析对象, 由基尔霍夫电流电压定律可以得到

$$\begin{cases} I'_T = I_H + I_M \\ I_M \times X'_M + I'_T \times X'_T = U_{dcL} - U_{dcM} \\ I_H \times X'_H + I'_T \times X'_T = U_{dcL} - U_{dcH} \\ I_M \times X'_M + U_{dcM} = I_H \times X'_H + U_{dcH} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)计算可以得到

$$\begin{cases} I_M = \frac{U_{dcL} \times X'_H + U_{dcH} \times X'_T - U_{dcM} \times (X'_H + X'_T)}{X'_H \times X'_M + X'_T \times X'_M + X'_T \times X'_H} \\ I_H = \frac{U_{dcL} \times X'_M + U_{dcM} \times X'_T - U_{dcH} \times (X'_M + X'_T)}{X'_H \times X'_M + X'_T \times X'_M + X'_T \times X'_H} \end{cases} \quad (6)$$

结合图 3 以及式(4)–(6)可以计算出共用接地点的偏磁电流 I_T

$$I_T = I_H + I_M \quad (7)$$

因此, 流过变电站内各台变压器中性点的偏磁电流分别为

$$\begin{cases} I'_{T1} = \frac{X_T}{X_T + X'_{T1}} \times (I_H + I_M) \\ I_T = \frac{X'_{T1}}{X_T + X'_{T1}} \times (I_H + I_M) \\ I_{T1} = \frac{1}{4} \times \frac{X_T}{X_T + X'_{T1}} \times (I_H + I_M) \end{cases} \quad (8)$$

流过单台交流主变压器的偏磁电流为 $\frac{X'_{T1}}{X_T + X'_{T1}} \times (I_H + I_M) \times \frac{1}{2}$ 。

流过单台交流主变与单台换流变中性点的偏磁电流之比为

$$\frac{I_T}{I_{T1}} = \frac{I_T}{0.25I'_{T1}} = \frac{X_{T1} + X_{c1}}{X_M + X_{hc}} \quad (9)$$

式(9)中, 按照文中模型计算 $X_{T1} + X_{c1}$ 、 $X_M + X_{hc}$ 约为: 10.083、4.768 Ω 、所以流过主变与换流变的偏磁电流比值约为 2.115, 即流过主变压器绕组的偏磁电流约为流过换流变压器绕组偏磁电流的 2 倍。同时, 换流变压器在设计生产时考虑过直流偏磁的因素, 因此, 可以考虑仅在交流主变上采取相应的抑制措施来减小变压器直流偏磁对在交直流系统的影响。

2 不同变压器直流偏磁抑制措施仿真分析

2.1 抑制变压器直流偏磁的主要方法

根据多台变压器发生直流偏磁时, 偏磁电流的分布情况以及计算得到不同变压器偏磁电流之间的关系可考虑使用的抑制措施有: 反向注入电流法、中性点串电容法、串电阻法、串阻容法、线路串点电容法、电位补偿等方法。其主要优缺点见表 1。

2.2 仿真计算模型的搭建

文中使用 PSASP 对高中压测其他交流系统进行等值, 得到相应的等值系统, 利用 PSCAD/EMTDC 搭建德宝直流系统详细模型。其控制方式和参数均采用实际的控制方式和参数。采用文[14]的方法来构成自耦变压器, 用于模拟单相三绕组变压器。基于中心几何建立的 UMEC 变压器模型同时考虑了同相绕组以及不同相绕组间的耦合作用^[3], 在 PSCAD 中使用 $U-I$ 曲线来描述铁心饱和特性。

文中使用如图 1(b)所示的 4 台变压器来模拟换流站中的实际变压器, 其饱和特性是由拐点电压、空心电抗和励磁电流 3 个参数构成连续的拐点曲

表 1 多种抑制措施比较

Table 1 The comparison of various DC bias suppression measures

考虑因素	反向注入 电流法	中性点串联 电容法	中性点串联 电阻法	中性点串联 阻容法	线路串电容法	电位补偿法	其他方法
结构	较复杂	较复杂	简单	较复杂	简单	较复杂	地磁感应电流
运行维护成本	高	低	中	中	高	低	较严重的高纬
对继电保护影响	无	较小	较大	较大	较大	较小	度地区变电站
造价	最高	中	低	中	高	高	或者电压等级
通用性	高	高	中	高	低	高	较高的重要变 电站

线。仿真计算参数分别取 1.25、0.32 和 1.0%, 其特性曲线见图 4。

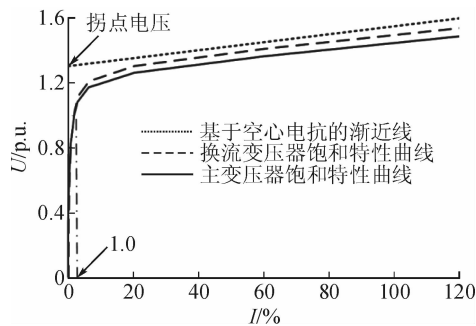


图 4 变压器饱和特性曲线

Fig. 4 The saturation characteristic curve of the transformer

2.3 仿真分析

交流系统中主要用谐波畸变率来判定各次谐波在电压中所含的比例关系;总电压谐波畸变率 THD_v 和第 k 次谐波的含有率 HR_{v_n} 的计算见式(10)。

$$\begin{cases} THD_v = \left(\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2 / U_1^2} \right) \times 100\% \\ HR_{v_n} = (U_n / U_1) \times 100\% \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, U_n 、 U_1 分别为 n 次谐波电压和基波电压的有效值。经仿真验证交流电流与电压中的谐波成分变化趋势基本一致。

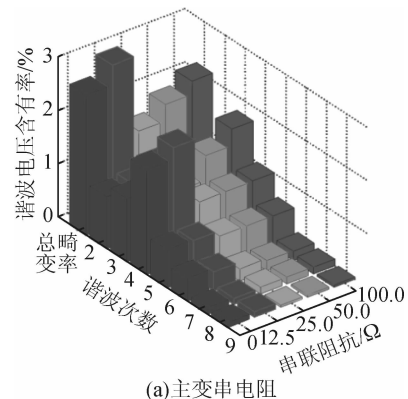
根据国标 GB/T 14549—93 可知,谐波含量以相电压中谐波含量为标准;110 kV 等级的谐波电压总畸变率小于 2%,奇次谐波含有率小于 1.6%,偶次谐波含有率小于 0.8%^[15]。根据 IEC 标准,当电压等级高于 230 kV 时,3、5、7 次谐波含有率不能超过 2%,2、4、6 次谐波含有率分别小于 1.5%、1%、0.5%。IEEE Std.519—1992 中,电压等级高于 161 kV 时,单次谐波含有率不超过 1%,总谐波畸变率不超过 1.5%,高压直流输电端 THD 可达 2%^[16-17]。文中的换流母线谐波标准可以参照以上各标准对比分析。

文中选择通过检测变电站与换流站之间连接母线的谐波电压来判断各种抑制措施的效果。考虑较为严重的情况。主变中性点的偏磁电流约为 150 A,

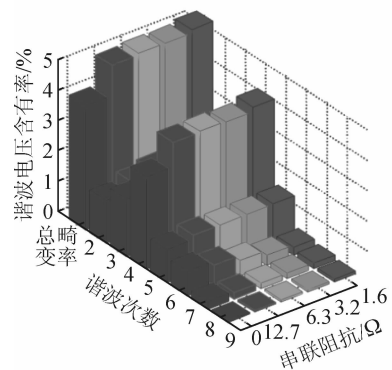
换流变偏磁电流约为 72 A。根据第 2 节中的计算结果可选择仅在交流主变上采用相应的抑制措施,文中将通过仿真计算对其进一步验证。

2.3.1 变压器中性点串电阻

为了得到合适的串联电阻的阻值,采用变电阻多次仿真验证得到该直流单极大地运行时,换流母线 A 相中的谐波电压含有率见图 5。



(a)主变串电阻



(b)主变、换流变串电阻

图 5 串电阻方法时母线电压谐波含有率

Fig. 5 The harmonic content under the method of connecting series resistance

在未串入电阻时,换流母线 A 相电压中总谐波畸变率及其各次谐波含有率均较大,尤其是 4 次谐波含有率;主变中性点串入较小电阻时,其效果并不是很明显,当电阻约为 25 Ω 时,330 kV 母线电压的总谐波畸变率以及各次谐波含有率均能满足电网正常运行的需要。

各变压器中性点均串入一定电阻时,因串入阻值过大抬高了变电站/换流站的地电位,使得站中变压器直流偏磁现象更为严重。由以上仿真可知:采用串电阻的方法时,只需要在交流主变上串入 25~50 Ω 的电阻用于抑制变压器直流偏磁。

2.3.2 变压器中性点串电容

采用串电容方法时,其容抗值约为 1~3 Ω ,以 50 Hz 工频折算其电容值约为 1 062~3 186 μF 。在该实际工程中,这只是可采用的近似值,仿真验证见图 6。

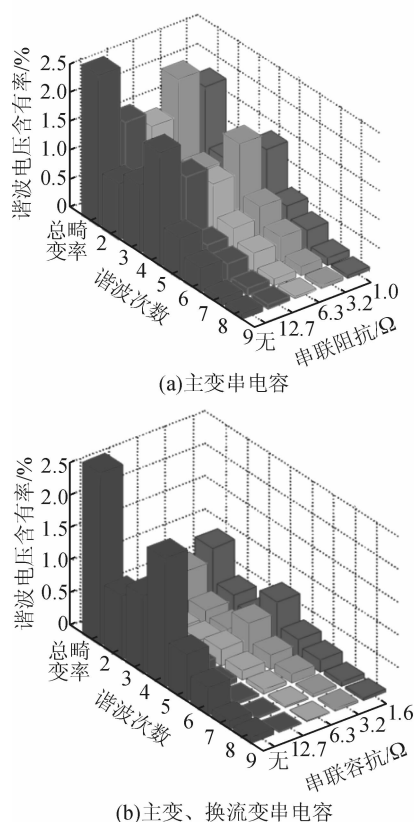


图 6 串电容方法时母线电压谐波含有率

Fig. 6 The harmonic content under the method of connecting series capacitor

在主变中性点串入一定的电容能够有效地隔断由直流输电工程而引起的变压器直流偏磁现象。串入电容容抗值约为 6.3 Ω 时,其抑制效果最好;单次谐波含有率最大的 4 次谐波含有率约为 0.8%。站内变压器均采用串电容的方法来抑制变压器直流偏磁时,330 kV 母线电压的谐波成分更小,各次谐波含有率均能满足电网实际运行的需求,且容抗值的变化对其抑制作用影响较小。

2.3.3 变压器中性点串阻容

使用串阻容方法得到计算仿真见图 7。

仅主变采取中性点串联阻容抑制措施,由仿真结果图 7 所示,主变交流侧母线总谐波畸变率为

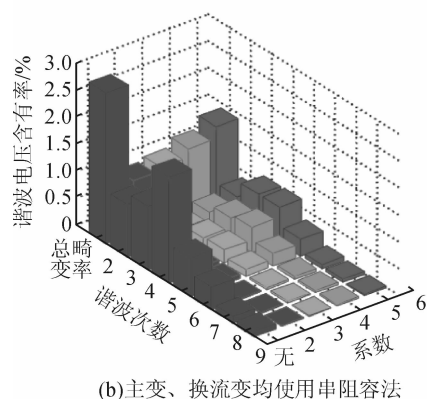
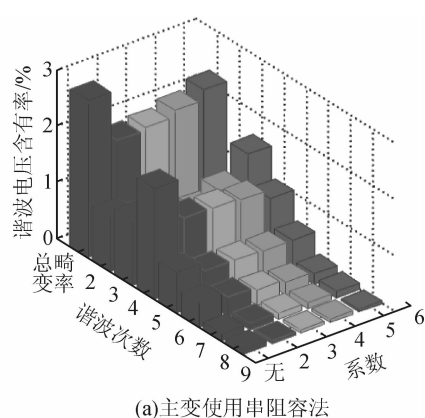


图 7 串阻容方法时母线电压谐波含有率

Fig. 7 The harmonic content under the method of connecting series resistance and capacitor

2.7%。当 R/C 取值为 12.5 $\Omega/25 \Omega$ 时,总谐波电压畸变率为 1.4% 低于最大允许值 2%,此时 2、4 次谐波电压畸变率分别为 0.4%、0.55%,其他低次谐波的畸变率均满足系统运行要求。站内所有变压器中性点采取串电容抑制措施,当容抗值改变取值为 12.5 $\Omega/25 \Omega$ 时,直流系统换流母线总谐波畸变率降为 0.82%,2、4 次谐波电含有率分别为 0.4%、0.3%。表明所有变串联阻容,直流偏磁抑制效果均优于上述方式。

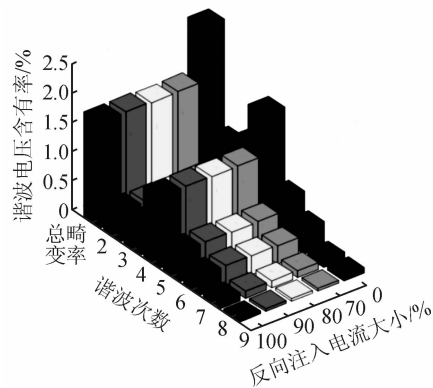
2.3.4 变压器中性点反向注入电流

文中选择反向注入电流分别为 70%、80%、90%、100% 时,仿真得到变电站与换流站之间母线电压谐波含有率见图 8。

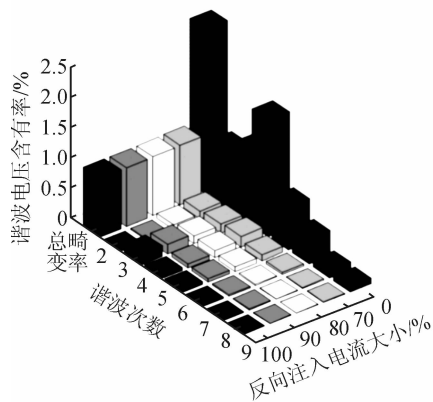
仅在交流主变压器采用反向注入电流法时,能够有效地抑制主变压器的直流偏磁,但是,偶次谐波电压(主要是 4 次)不能满足国标要求。站内变压器均采用反向注入电流法时,总畸变率小于 0.9%,远小于 2%,各次谐波含有率均能满足相应标准的要求。交流主变与换流变压器均采用此方法时,总谐波电压畸变率各次谐波含有率更小。

2.3.5 变电站/换流站之间串阻抗

文中仿真中串入阻抗为: $Z_d = k(0.08 + j0.5) \Omega$, k 为阻抗系数。母线串阻抗时电压谐波含有率见图 9。



(a)主变注入反向电流



(b)主变、换流变注入反向电流

图 8 注入反向电流时母线电压谐波含有率

Fig. 8 The harmonic content under the method of injecting reverse current

由图 9 仿真验证可知,变电站、换流站之间串阻抗时,可以在一定程度上减小各次谐波含有率以及总的谐波畸变率。但其减小程度有限,并不能明显地抑制变压器直流偏磁对交直流系统的影响。

2.4 小结

根据以上仿真计算,当选择仅在主变上采用相应抑制措施及均采用相应抑制措施其综合效果分析见表 2。

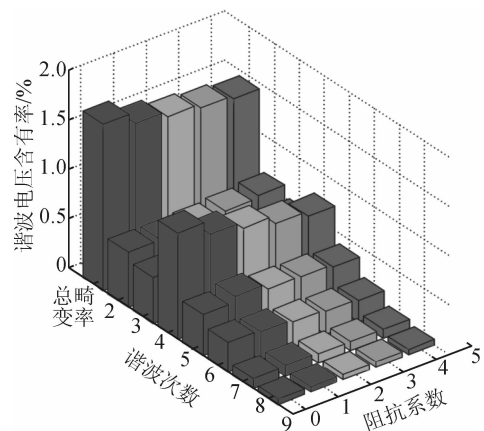


图 9 母线串阻抗时电压谐波含有率

Fig. 9 The harmonic content under the method of connecting resistance at bus bar

根据以上仿真计算,各方法均能有效地抑制变压器直流偏磁,其中,串电容法和反向注入电流法效果最明显。此外,在串电阻方法中,串入电阻过大时,会影响变压器零序阻抗,且变压器中性接地点不能可靠接地。反向注入电流法中,可通过直接检测流过变压器绕组直流的电流或者通过分析母线谐波电压(偶次)计算需要注入的电流的大小;使用该抑制方法包括直流电源在内的成本太高。

综合考虑各种抑制措施的抑制效果,并兼顾电网安全、经济运行、非线性负荷的发展,以及治理措施的技术经济评估等因素。文中所采用的模型可选择仅在交流主变采取中性点串电容法来抑制直流偏磁现象。

3 结语

文中以变电站与换流站合并建站的情况作为多台不同变压器直流偏磁的典型研究对象,在地电位确定的情况下,详细分析计算了流过各变压器的偏磁电流的大小。并根据计算流过换流变压器中性

表 2 采取不同抑制措施效果对比

Table 2 Comparison the effect between various DC bias suppression measures

抑制措施	使用范围	效果最好时的参考值	总谐波畸变率		2次谐波		4次谐波		总体要求
			最优值/%	允许值 2%	最优值/%	允许值 1.50%	最优值/%	允许值 1%	
串联电容	仅交流主变	6.3	0.92	✓	0.42	✓	0.78	✓	✓
	所有变压器	6.3	0.85	✓	0.40	✓	0.63	✓	✓
串联电阻	仅交流主变	25.0	1.37	✓	0.75	✓	0.93	✓	✓
	所有变压器	25.0	3.10	×	1.00	✓	1.30	×	×
串联阻容	仅交流主变	12.5/25.0	1.37	✓	0.40	✓	0.55	✓	✓
	所有变压器	12.5/25.0	0.82	✓	0.40	✓	0.30	✓	✓
反向电流	仅交流主变	100.0%	1.24	✓	0.67	✓	1.03	×	×
	所有变压器	100.0%	0.85	✓	0.02	✓	0.05	✓	✓
变电站/换流站串阻抗		4.0	1.35	✓	0.40	✓	0.50	✓	✓

点的偏磁电流要为主变中性点的偏磁电流 1/2, 主变承受了较大的偏磁电流。

通过仿真计算, 各抑制措施均能从一定程度上达到抑制直流偏磁的作用。当仅在交流主变中采用相对应的直流偏磁抑制措施时, 同样能有效地抑制直流偏磁。综合考虑各种因素, 可选择仅在交流主变上采用串电容的方法用于抑制直流偏磁。在含有多台不同参数变压器的变电站或换流站中, 可参照文中所计算方法及结论采取相应的抑制措施。

参考文献:

- [1] 朱岸明, 王森, 胡攀峰, 等. 德宝直流输电对 750 kV 宝鸡主变压器运行影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12): 67-70.
ZHU Anming, WANG Sen, HU Panfeng, et al. Influences of the Deyang-Baoji DC transmission line on the 750 kV power transformer in Baoji power substation[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2010, 26(12): 67-70.
- [2] 欧林, 王渝红, 李兴源, 等. 变电站与换流站合并建站时交直流系统谐波畸变分析[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 24-28.
OU Lin, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Analysis of AC-DC system harmonic distortion when the power substation and the converter station are built together[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 24-28.
- [3] 冷迪. ± 500 kV 宝德直流系统对极址附近输电线路及 750 kV 变压器影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 4.
LENG Di. Research on effect of ± 500 kV Baode DC transmission on transmission line and 750 kV transformer near the electrode site[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 4.
- [4] LI Xiaoping, WEN Xishan, MARKHAM P N, et al. Analysis of nonlinear characteristics for a three-phase, five-limb transformer under DC bias[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2504-2510.
- [5] 潘卓洪, 张露, 谭波, 等. 高压直流输电入地电流在交流电网分布的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 110-115.
PAN Zhuohong, ZHANG Lu, TAN Bo, et al. Simulation and analysis of HVDC earth-return current's distribution in AC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 110-115.
- [6] 任志超, 续建国, 张一坤. 交直流互联系统直流地表电位简易算式[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 256-264.
REN Zhichao, XU Jianguo, ZHANG Yikun. Study of the simple formula of DC surface potential in AC-DC interconnected large power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 256-264.
- [7] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.
KUAI Dizheng, WAN Da, ZOU Yun. Analysis and handling of the impact of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 81-82.
- [8] 赵杰, 黎小林, 吕金壮, 等. 抑制变压器直流偏磁的串联电阻措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 88-91.
ZHAO Jie, LI Xiaolin, LYU Jinzhuang, et al. Applying series resistor to restrain power transformer DC biasing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 88-91.
- [9] 皇甫成, 阮江军, 张宇, 等. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 117-121.
HUANGFU Cheng, RUAN Jiangjun, ZHANG Yu, et al. DC magnetic bias induced current effects on transformer and restricting methods[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 117-121.
- [10] 杜忠东, 董晓辉, 王建武, 等. 直流电位补偿法抑制变压器直流偏磁的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 69-72.
DU Zhongdong, DONG Xiaohui, WANG Jianwu, et al. Test and analysis on restraining transformer DC bias by changing electric potential of grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 69-72.
- [11] 尚春. HVDC 地中电流对交流变压器影响的抑制措施[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.
SHANG Chun. Measure to decrease the neutral current of the AC transformer in HVDC ground-return system[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 52-54.
- [12] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.
ZHU Yiyang, JIANG Weiping, ZENG Zhaohua, et al. Studying on measures of restraining dc current through transformer neutrals[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 1-7.
- [13] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO Wanjun. High-voltage direct current technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [14] 曾麟钧, 林湘宁, 黄景光, 等. 特高压自耦变压器的建模和电磁暂态仿真[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 91-97.
ZENG Linjun, LIN Xiangning, HUANG Jingguang, et al. Modeling and electromagnetic transient simulation of UHV autotransformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 91-97.
- [15] GB/T 14549—93 电能质量公用电网谐波[S]. 1993.
GB/T 14549—93 Quality of electric energy supply harmonics in public supply network[S]. 1993.
- [16] IEC 61000-3-6—2008 Assessment of emission limits for dis-

- [18] 郭林勇,何正友,钱清泉. 单端行波故障测距的频域方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):99-104.
WU Linyong, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A frequency domain approach to single-ended traveling wave fault location[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 99-104.
- [19] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. 利用故障特征频带和TT变换的电缆单端行波测距[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):103-112.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. A single terminal cable fault location method based on fault characteristic frequency band and TT transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 103-112.
- [20] 杜林,陈宏业,陈伟根,等. 采用双端电压行波法的输电线路故障定位系统设计[J]. 高电压技术,2011,37(2):304-309.
DU Lin, CHEN Hongye, CHEN Weigen, et al. Transmission line fault location system using two-terminal voltage traveling wave[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 304-309.
- [21] 梁睿,靳征,王崇林,等. 行波时频复合分析的配电网故障定位研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):130-136.
LIANG Rui, JIN Zheng, WANG Chonglin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of travelling wave time and frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 130-136.
- [22] 董森森,武振宇,高自力,等. 一种可带电安装的高压电能质量在线监测装置[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(4):73-78.
DONG Sensen, WU Zhenyu, GAO Zili, et al. High voltage power quality on-line monitoring device at live installation condition[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(4): 73-78.
- [23] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报,2012,27(8):172-178.
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- 张翠玲(1974—),女,博士,副教授,主要研究方向为电网故障分析和诊断。
江雪晨(1984—),男,博士研究生,主要从事电力系统故障诊断及继电保护研究工作。

(上接第165页)

- torting loads in MV and HV power systems-basic EMC publication[S].1996.
- [17] IEEE Std 519—1992 IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power system [S].1992.
- 王渝红(1971—),女,教授,硕士生导师,主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、新能源并网方式研究。
欧林(1987—),男,硕士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、自动化技术(通信作者)。