

考虑CVT输出特性的换流变剩磁测算方法

韩平平¹, 王焱¹, 陈宇翔¹, 陈忠², 胡迪²

(1. 合肥工业大学 新能源利用与节能安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;

2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230061)

摘要:特高压换流变空载合闸时,其剩磁会改变铁心磁通的大小和方向,极易造成严重的励磁涌流,导致换流变无法正常投入运行。针对换流变剩磁测算,分析电容式电压互感器(CVT)输出数据存在误差是由系统频率变化引起的,根据误差式进行校正并基于电压积分法给出考虑CVT输出特性的换流变剩磁测算方法。在PSCAD/EMTDC中搭建相关仿真模型,对Y、D桥换流变的电压正向、负向峰值处分别进行分闸实验,并根据所提测算方法确定换流变剩磁。利用校正前、校正后以及监测的换流变剩磁完成选相合闸对比实验,实验结果表明所提方法能够有效测算换流变剩磁,为励磁涌流抑制手段提供参考依据。

关键词:换流变;剩磁;CVT;电压积分法;选相合闸

中图分类号:TM721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202401010

0 引言

换流变作为高压直流输电工程的关键设备之一,其直接关系到直流工程的安全可靠运行。然而,在换流变退出运行过程中,由于换流变铁心的磁滞效应,其内部会残余部分磁链,易使换流变合闸瞬间产生严重的励磁涌流,导致换流变无法正常投入运行^[1-3]。准确测算换流变剩磁,可以为励磁涌流抑制手段提供准确的参考依据,对于换流变本身甚至电网的安全稳定运行都具有重要意义^[4-6]。

目前针对换流变剩磁测算的问题,已有不少学者采用经验估计、基于励磁涌流和基于暂态电流差极值等方法对换流变剩磁测算展开了研究^[7-10]。虽然上述方法在换流变剩磁测算研究方面已有一定的成效,但依然存在着方向不可确定、模型建立困难和附加激励改变原换流变剩磁等问题,可行性仍待考究。工程应用中,普遍采用电压积分法测算换流变剩磁。文献[11]提出了一种基于电压积分法的剩磁测算改进方法,但并未解决剩磁方向确定的问题;文献[12]分析了铁心剩磁和最佳关合相位关系,着重于断路器截流和暂态恢复电压对铁心剩磁影响;文献[13-14]提出了依据变压器空载合闸后在一次侧检测的电压、电流和空载合闸角,寻找铁心饱和时刻,估算变压器分闸后铁心的剩磁,侧重于研究分闸角与铁心剩磁的关系特性;文献[15]研究了基于数

值积分测算换流变剩磁的方法,并用指数函数拟合分闸后的暂态电压,但是忽略了超/特高压工程中采用电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)输出数据存在误差这一问题^[16-17]。

本文提出了考虑CVT输出特性的换流变剩磁测算方法,研究了换流变空载合闸过程,分析了CVT输出数据存在误差的原因,阐述了电压积分法测算剩磁的基本原理,并提出“连续若干点呈下降趋势”判据确定电压积分法的下限及剩磁方向,“电压标幺值小于设定极小值”判据确定其上限。然后,在PSCAD/EMTDC中搭建考虑CVT的特高压换流变空载合闸仿真模型,分别让Y、D桥换流变在电压正向、负向峰值处分闸,记录分闸后一次侧暂态电压信息,结合所提方法测算换流变剩磁。将该方法测算的换流变剩磁和监测的换流变剩磁对比,并利用校正前、校正后以及监测的换流变剩磁完成选相合闸对比实验,验证所提方法的可行性。

1 特高压换流变剩磁测算机理

1.1 换流变空载合闸过程

在特高压直流输电系统中,12脉动换流桥由2个6脉动换流桥在交流侧以并联、直流侧以串联方式组合而成,2组换流变分别由3个单相变压器以Y、D桥方式组合而成^[18]。通过CVT从换流变一次侧获取电压信息,系统的拓扑结构如附录A图A1所示。

Y桥换流变和D桥换流变虽然在接线方式上有所不同,但二者的空载合闸过程类似。因此,以Y桥换流变A相为例,对换流变空载合闸过程展开理论分析,其等效电路如图1所示。图中: L_m 、 L_σ 分别为换流变一次侧的励磁电感和漏感; R_m 、 R_σ 分别为换流变一次侧的励磁电阻和漏电阻; C_T 为换流变对地

收稿日期:2023-04-24;修回日期:2023-10-24

在线出版日期:2024-01-29

基金项目:国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项(2016YFB0900600)

Project supported by the National Key Research and Development Program of “Smart Grid Technology and Equipment” (2016YFB0900600)

等效电容; U_s 为交流电源电压。

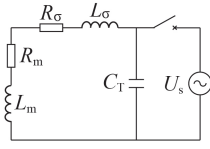


图1 单相变压器空载合闸等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of no-load closing of single-phase transformer

假设 $t=0$ 时合闸, 合闸时交流电源电压初相位为 α , 则交流电源电压为:

$$U_s(t) = U_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中: U_m 、 ω 分别为交流电源电压幅值、角频率。

由图1可知, 在换流变空载合闸时刻, 有:

$$L(di/dt) + Ri = U_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

式中: L 为换流变一次侧回路的总电感, $L = L_m + L_\sigma$; R 为换流变一次侧回路的总电阻, $R = R_m + R_\sigma$; i 为换流变一次侧的励磁电流。

不考虑换流变上一次动作后的磁链, 由式(2)可得换流变合闸瞬间对应的磁链方程为:

$$\psi(t) = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \psi_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-t/\tau} \quad (3)$$

式中: ψ_m 为换流变一次侧绕组的稳态磁链幅值, $\psi_m = U_m L / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$; τ 为衰减时间常数, $\tau = L/R$; φ 为等效系统阻抗角, $\varphi = \arctan(\omega L/R)$ 。

考虑换流变上一次动作后的磁链 $\psi_r = \psi_{r0} e^{-t/\tau}$, ψ_{r0} 为换流变铁心剩磁, 则换流变合闸瞬间对应的磁链方程为:

$$\psi(t) = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + [\psi_{r0} - \psi_m \sin(\alpha - \varphi)] e^{-t/\tau} \quad (4)$$

换流变合闸瞬间的动态磁链包括稳态分量和暂态分量, 稳态分量 $\psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$ 相位滞后于交流电源电压 90° , 直流分量 $[\psi_{r0} - \psi_m \sin(\alpha - \varphi)] e^{-t/\tau}$ 包括剩磁和偏磁, 随时间逐渐衰减。若合闸瞬间剩磁与偏磁相抵消, 即 $\psi_{r0} = \psi_m \sin(\alpha - \varphi)$, 合闸瞬间产生的励磁涌流最小; 若合闸时刻不当, 合闸瞬间换流变一次侧绕组磁链最大将达到 $2\psi_m + \psi_{r0}$, 产生的励磁涌流最大, 严重影响换流变的安全稳定运行, 同时存在引起保护装置误动的风险。

断路器断开后, 由基尔霍夫电压定律可得:

$$U_T + RC_T(dU_T/dt) + LC_T(d^2U_T/dt^2) = 0 \quad (5)$$

式中: U_T 为换流变对地等效电容两端的暂态电压。

求解式(5)可得开闸后换流变上的暂态电压为:

$$U_T(t) = nU_m e^{-\delta t} \sin(\omega_\delta t + \beta) \quad (6)$$

式中: n 为电压幅值系数; δ 为衰减系数; ω_δ 为衰减振荡角频率; β 为暂态电压初相角。衰减系数 δ 越大, 衰减越快; 衰减振荡角频率 ω_δ 越大, 振荡周期越小, 振荡越快。由式(6)可知, 断路器断开后, 换流变各

相上暂态电压不会立刻衰减为0, 而是呈现出振荡衰减的趋势。

考虑到断路器上存在均压电容, 断路器断开后, 母线电压会通过断路器上均压电容 C_{CB} 耦合传递至换流变侧, 将原来等效电容 C_T 改变为新的等效电容 $C_T + C_{CB}$, 若增大均压电容, 等效电容随之增大, 衰减系数减小, 衰减速度减慢, 谐振过程持续时间延长; 电压幅值减小, 影响电压积分法的积分起始点。

1.2 CVT输出特性

工程中一般采用电磁式电压互感器 (potential transformer, PT) 或者 CVT 获取换流变一次侧电压波形数据。电压等级在 66 kV 以下的电网中多采用 PT; 而 66 kV 以上常采用 CVT。

CVT 由电容分压器、中间变压器、补偿电抗器和阻尼器等部分组成, 原理图如附录 A 图 A2 所示。其工作原理为: 电容分压器是将高压侧电压降至中压水平, 再由中间变压器将中压水平电压降至低压水平, 补偿电抗器对电容分压引起的相位差进行补偿, 阻尼器能够有效抑制与电网中电容参数匹配造成的铁磁谐振。

考虑到中间变压器的励磁阻抗和阻尼器的等效电抗很大, 可视为开路, 故建立如图2所示的 CVT 等效电路展开分析。图中: U_i 为高压侧输入电压; Z_{C1} 、 Z_{C2} 、 Z_1 、 Z'_1 、 Z_{Lc} 分别高压分压电容阻抗、中压分压电容阻抗、中间变压器一次侧漏抗、中间变压器二次侧等效到一次侧的等效漏抗、补偿电抗器阻抗; Z_m 、 Z'_1 、 Z'_0 分别为励磁支路阻抗、二次侧负载等效到一次侧的等效阻抗、阻尼支路等效到一次侧的等效阻抗; I 为中压变压器一次侧电流; I_1 、 I_2 分别为流过 Z_{C1} 、 Z_{C2} 的电流; U'_2 为输出负载的两端电压。

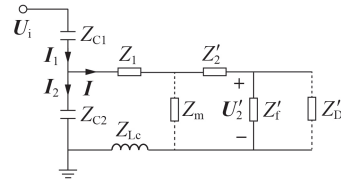


图2 CVT等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of CVT

根据基尔霍夫电压定律可知:

$$U_i = [(Z_{C1} + Z_{C2})(Z_1 + Z'_1 + Z_{Lc}) / Z_{C2} + Z_{C1}] I + (1 + Z_{C1} / Z_{C2}) U'_2 \quad (7)$$

由于补偿电抗器的阻抗远远大于换流变绕组阻抗, 即 $Z_{Lc} \gg Z_1 + Z'_1$, 为保持输出与输入的线性关系, 需满足:

$$(1 + Z_{C1} / Z_{C2}) Z_{Lc} + Z_{C1} = 0 \quad (8)$$

简化得:

$$\omega^2 (C_1 + C_2) L_c = 1 \quad (9)$$

式中： C_1 、 C_2 分别为高压分压电容值、中压分压电容值； L_c 为补偿电抗器电感值。由式(9)可知，当分压电容引起输出数据与实际数据存在相位差，利用补偿电抗器弥补该部分的相角差时，考虑补偿电抗器的同时，也不能忽略系统频率对输出数据的影响。

在工频下，补偿电抗器和电容分压器的等效电容近似处于谐振状态，此时补偿电抗器电抗 X_{Lc} 和电容分压器等效容抗 X_{Cc} 有：

$$X_{Lc} \approx X_{Cc} \quad (10)$$

当系统频率变化时，补偿电抗器势必会产生剩余电抗 X_0 ，剩余电抗上电压 ΔU 为：

$$\Delta U = X_0 I = \left(\omega L_c - \frac{1}{\omega C_c} \right) \frac{P + jQ}{U_1} \quad (11)$$

式中： C_c 为电容分压器等效电容值； P 、 Q 分别为系统的有功功率和无功功率； U_1 为中间变压器一次电压。

将式(10)代入式(11)中，可得：

$$\begin{cases} \Delta U = \left(\frac{\omega}{\omega_N} - \frac{\omega_N}{\omega} \right) \frac{P + jQ}{\omega_N C_c U_1^2} \\ \Delta U_\omega = \Delta U \sin \varphi = \left(\frac{\omega}{\omega_N} - \frac{\omega_N}{\omega} \right) \frac{Q}{\omega_N C_c U_1^2} \\ \Delta \delta_\omega = \Delta U \cos \varphi = \left(\frac{\omega}{\omega_N} - \frac{\omega_N}{\omega} \right) \frac{P}{\omega_N C_c U_1^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中： ΔU_ω 、 $\Delta \delta_\omega$ 分别为电压的幅值和相角误差； ω_N 为额定角频率。根据式(12)可知，当系统频率变化时，CVT输出数据误差既含有电压相角误差，又含有电压幅值误差。

综上所述，在工频下CVT二次侧输出与一次侧输入能够保持线性关系，此时，CVT二次侧输出能够准确记录一次侧输入的电压数据；当系统频率变化时，CVT二次侧输出与一次侧输入不能保持线性关系，此时，二次侧输出数据存在误差。因此，在利用电压积分法测算换流变剩磁之前，需要对系统频率变化引起的电压数据进行校正；否则，测算的换流变剩磁会存在较大误差。

2 换流变剩磁测算

2.1 电压积分法

换流变空载运行时，设其一次侧绕组感应电动势为 e ，铁心磁链为 ψ ，由电磁感应定律可知：

$$e(t) = -d\psi/dt \quad (13)$$

对式(13)积分可得换流变剩磁为：

$$\psi(t) = \psi(t_{\text{begin}}) - \int_{t_{\text{begin}}}^{t_{\text{finish}}} e(t) dt \quad (14)$$

式中： $\psi(t_{\text{begin}})$ 为换流变磁链的初始值； t_{begin} 、 t_{finish} 分别为积分下限、积分上限。

利用电压积分法测算换流变剩磁时，积分下限

t_{begin} 应该选择在断路器分闸前的稳定状态，且电压位于峰值处，此时电源激励换流变产生的磁链满足积分起始点铁心磁链为0的条件。断路器断开后，由于断路器上均压电容以及换流变对地电容的存在，换流变一次侧电压呈衰减振荡趋势，当换流变完成“电能-磁能”转换时，换流变的压降才会变成0，对应的时刻即为积分上限 t_{finish} 。此时换流变剩磁为：

$$\psi_r = - \int_{t_{\text{begin}}}^{t_{\text{finish}}} e(t) dt \quad (15)$$

2.2 考虑CVT输出特性的剩磁测算方法

所提换流变剩磁测算方法具体思路如下：首先根据CVT等效电路分析出其二次侧输出与一次侧输入不能保持线性关系是由系统频率变化引起的，并对由系统频率变化引起的电压数据误差进行校正；然后利用电压积分法分别处理校正前、后的电压数据获取换流变剩磁的大小，根据电压和磁链关系、积分起始点确定换流变剩磁的方向，并利用选相合闸实验验证所提方法的可行性。

考虑CVT输出数据存在的幅值和相角误差，对换流变剩磁测量数据进行校正，方法如下：在仿真时，记录每一时刻系统的电压、有功功率、无功功率以及系统频率，如果系统频率发生改变，则根据式(12)推出的CVT输出电压的幅值和相位误差计算式对其校正；如果系统频率没有改变，则不需要对其校正。

CVT输出数据为“电压幅值-相角”数据，而采用电压积分法测算换流变剩磁需要将电压幅值在时间上积分，因此需要将“电压幅值-相角”数据转换为“电压幅值-时间”数据，过程如下：设三相电压中的任一相为基准相，令基准相的初相位为0，得到基准相的“电压幅值-时间”数据，并根据其他相与基准相的关系，得到三相的“电压幅值-时间”数据。以Y桥换流变为例，令其A相为基准相，即有 $U_A = U_m \cos(\omega t + \varphi)$ 。设Y桥换流桥A相电压的初相角 φ 为0，则A相电压相位角为 ωt ，与时间相差 ω 倍。以此类推，B、C相数据可由其与A相相角相差 120° 和 240° 获取。

本文在测算特高压换流变剩磁时，数据处理可分为以下步骤：

1) 步骤1，首先读取CVT输出的“电压幅值-相角”数据，校正并将其转换为“电压幅值-时间”数据；

2) 步骤2，对转换后数据取绝对值，寻找所有的极大值点；

3) 步骤3，根据“连续若干点呈连续下降趋势”判据确定电压积分法的积分下限，根据“电压标么值小于设定极小值”判据确定电压积分法的积分上限；

4) 步骤4，由积分下限对应时刻和换流变内磁链滞后其电压 90° 这2个条件共同确定换流变剩磁

的方向,电压和磁链关系见附录B图B1;

5)步骤5,对积分上、下限之间的所有极大值点进行拟合,生成拟合函数,在该区间内对拟合函数积分即可获得换流变剩磁的大小。

具体流程如附录B图B2所示。

3 仿真实验

3.1 换流变剩磁测算模型搭建

换流变合闸瞬间产生励磁涌流的根本原因在于换流变空载合闸时铁心内剩磁的叠加效应和合闸相位角的随机性,而通过选相合闸技术抑制励磁涌流的本质在于准确测算换流变剩磁以确定最佳合闸角。因此,如何对换流变剩磁进行测算,是利用选相合闸技术抑制励磁涌流的前提。

本文结合某 ± 1100 kV特高压直流输电工程,按照图A1所示拓扑,在PSCAD/EMTDC中搭建该工程考虑CVT的逆变侧换流变模型,模型所用换流变的基本参数见附录C表C1。

根据所搭建的换流变模型进行实验,仿真总时长设置为5 s,具体仿真过程如下:仿真开始时Y、D桥换流变对应的三相断路器均处于闭合状态,系统投入运行并在0.02 s后逐渐趋于稳定;1.985 s时(Y、D桥换流变A相电压的正向峰值处),Y、D桥换流变的三相断路器同时断开。由于Y、D桥换流变的三相断路器上存在均压电容,与换流变一次侧电感形成谐振,因此在断路器断开后,换流变各相对应的暂态电压不会立刻衰减为0,而是呈现出振荡衰减的趋势。Y桥换流变A相一次侧经CVT测得的暂态电压波形如图3所示。D桥换流变A相一次侧经CVT测得的暂态电压波形如图4所示。图中: U_{YA} 、 U_{DA} 分别表示Y、D桥换流变A相一次侧经CVT测得的暂态电压标么值。

分别获取Y、D桥换流变经CVT测得换流变一次侧绕组的暂态电压波形,并结合2.2节所提方法测算换流变剩磁的大小和方向。

在Y、D换流变A相电压的负向峰值处断开三相断路器,暂态电压变化趋势与图3、4类似。Y、D桥换流变在电压正向和负向峰值处断开,测算的换流变剩磁结果见表1。表中剩磁为标么值。

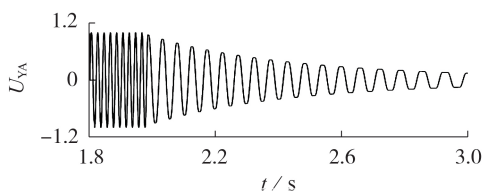


图3 Y桥换流变A相暂态电压变化

Fig.3 A-phase transient voltage change of Y-bridge converter transformer

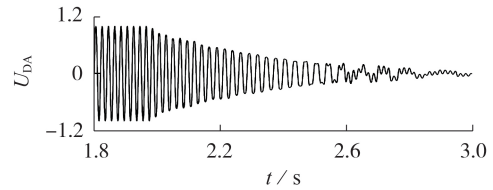


图4 D桥换流变A相暂态电压变化

Fig.4 A-phase transient voltage change of D-bridge converter transformer

表1 换流变在正、负峰值分闸后剩磁

Table 1 Residual magnetic of converter transformer after positive and negative peak opening

换流变类型	分闸时刻/s	电压积分法 测算剩磁	PSCAD 监测剩磁	误差/%
Y桥	1.985	0.6176	0.6189	0.21
D桥	1.985	0.3318	0.3343	0.75
Y桥	1.995	-0.6237	-0.6319	1.30
D桥	1.995	-0.3422	-0.3464	1.22

由表1可知,根据所提方法测算的换流变剩磁误差均在3%以内,说明了所提方法的可行性。此误差来源于2个方面:一方面是利用电压积分法处理经CVT获取的换流变一次侧暂态电压数据,由于暂态电压振荡衰减过程持续时间长,确定积分上限时,设定暂态电压小于某一极小值即为零值;另一方面是对积分下限和上限之间所有极值点进行拟合获取拟合函数时,会存在微小误差。

3.2 均压电容对换流变剩磁的影响

现代高压断路器常采用多断口形式,如果电压在各断口上分布不均,在某一断口电压过高,便会降低整个断路器的灭弧能力。因此,常在每个断口处并联一个容值相等且较大的电容器使各个断口电压均匀分布,以此提升断路器的工作性能^[19-20]。断路器断开后,断路器上不同的均压电容会对换流变的剩磁测算产生影响,如图5所示。图中: U_{100} 、 U_{200} 、 U_{386} 分别表示均压电容分别为100、200、386 μF 对应换流变一次侧暂态电压标么值。

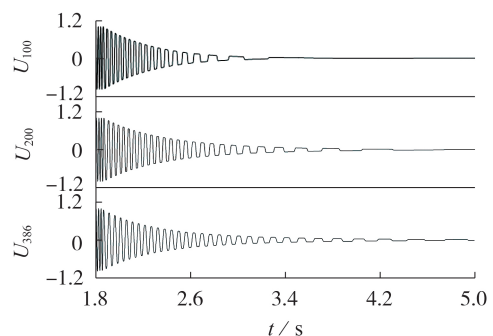


图5 不同均压电容对剩磁测算的影响

Fig.5 Influence of different voltage equalizing capacitances on residual flux measurement

由图5可知,随着断路器的均压电容的增大,谐振过程持续时间随之延长。当断路器上的均压电容容值分别为100、200、386 μF 时,测算的剩磁为0.7055、0.6843、0.6176 p.u.。可以看出:随着断路器均压电容的增大,换流变剩磁随之减小。

综上所述,通过增大断路器均压电容降低断路器分闸后换流变铁心内残留的剩磁时,要兼顾考虑过长谐振过程对积分误差的影响,因此需要选择合适的均压电容参数。

4 选相合闸验证测算方法的可行性

为了进一步验证考虑CVT输出特性的换流变剩磁测算方法的可行性,按照附录A图A1所示拓扑图在PSCAD/EMTDC搭建特高压换流变空载合闸模型,并在换流变一次侧增加受控电流源,利用磁化曲线来模拟测算的换流变剩磁。

本文设置Y、D桥换流变A相电压在正向峰值处三相断路器同步断开,以此获取三相剩磁,模拟工程中换流变分闸时的剩磁。以Y、D桥换流变在1.985 s分闸为例,利用文献[1]所提的方法,分别计算校正前、后测算的换流变剩磁及PSCAD/EMTDC监测剩磁所对应的选相合闸时刻,结果如附录D表D1所示。

在所搭模型中,利用受控电流源来模拟铁心内剩磁,将表D1的换流变剩磁经磁化曲线转换成电流形式,通过断路器来控制受控电流源。在进行选相合闸实验时,Y、D桥换流变每一相在对应合闸时刻合闸,Y桥换流变A相合闸后励磁涌流如图6所示。图中: I_{YA1} 、 I_{YA2} 和 I_{YA3} 分别为利用校正前、校正后和监测剩磁计算的合闸时刻合闸后Y桥A相励磁涌流大小。B、C相合闸后励磁涌流见附录D图D1。

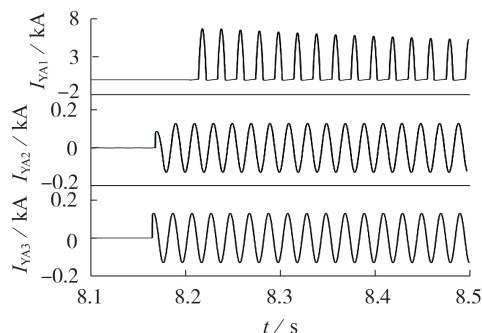


图6 Y桥换流变A相励磁涌流

Fig.6 A-phase inrush current of Y-bridge converter transformer

由图6及图D1可知:Y桥换流变在根据校正前剩磁计算的合闸时刻合闸时,A相励磁涌流达到了6.810 kA,B相励磁涌流达到了1.005 kA,C相励磁涌流达到了4.525 kA;而在根据本文所提方法校正后

计算的合闸时刻合闸时,整个合闸过程没有产生明显的励磁涌流尖峰,合闸过程结束后系统趋于稳定,稳态电流约为0.132 kA。

由表D1中D桥换流变三相合闸时刻可知:B相为首合相,C相为次合相,A相为末合相,三相励磁涌流见附录D图D2。由图D2可知:D桥换流变在根据校正前剩磁计算的合闸时刻合闸时,A相励磁涌流达到了1.272 kA,B相励磁涌流达到了4.469 kA,C相励磁涌流达到了5.355 kA;而根据本文所提方法校正后计算的合闸时刻合闸时,合闸过程出现了轻微的暂态扰动。这是由于D桥换流变接线方式的不同,其耦合作用使得某一相合闸时在其他相产生了感应磁链,从而出现了该扰动,但不足以造成交流母线电压畸变,导致换流变合闸失败,合闸过程结束后,系统趋于稳定,稳态电流约为0.140 kA。

综上所述,不论是Y桥换流变还是D桥换流变,如果剩磁测算误差偏大,在选相合闸实验计算合闸时刻时,误差会被放大,合闸时刻不准,合闸瞬间产生的偏磁与剩磁不能相互抵消,将会产生高达几倍甚至几十倍的励磁涌流,极易导致换流变合闸失败。此外,该对比实验也说明了本文所提方法的可行性,准确测算换流变剩磁可以为选相合闸提供合理的合闸时刻,进而能够有效抑制换流变合闸瞬间产生的励磁涌流。

5 结论

本文提出了考虑CVT输出特性的换流变剩磁测算方法,首先推导频率变化引起误差的校正式并在算法中校正,然后利用相角与时间之间的关系进行转换,最后结合电压积分法确定换流变剩磁的大小和方向。

在PSCAD/EMTDC上搭建考虑CVT的特高压换流变空载合闸仿真模型,对Y、D桥换流变正向和负向峰值处展开实验,与监测的换流变剩磁相比较,验证了本文考虑CVT输出特性测算换流变剩磁的准确性。此外,通过仿真实验说明增大断路器的均压电容可以降低换流变剩磁。

利用校正前测算的剩磁、本文所提方法测算的剩磁以及PSCAD监测的剩磁完成选相合闸对比实验,进一步验证所提方法的可行性。实验结果也表明:准确的换流变剩磁可以为利用选相合闸技术有效抑制换流变励磁涌流提供理论参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 韩平平,童青洋,王焱,等. 基于偏磁模拟的换流变选相合闸励磁涌流抑制策略[J]. 高电压技术,2022,48(12):4977-4985.
HAN Pingping, TONG Qingyang, WANG Yan, et al. Inrush

- current suppression strategy of converter transformer phase selection closing based on magnetic bias simulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4977-4985.
- [2] 刘贝,涂春鸣,肖凡,等. 中低压直流变压器拓扑与控制综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 232-246.
LIU Bei, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Review of topology and control strategy of medium-and low-voltage DC transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 232-246.
- [3] 王渝红,陈立维,寇然,等. 基于双判据的特高压直流分层接入系统换相失败预防控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 111-117, 131.
WANG Yuhong, CHEN Liwei, KOU Ran, et al. Commutation failure prevention control strategy based on double criteria for UHVDC hierarchical connection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 111-117, 131.
- [4] 刘对,李晓华,蔡泽祥,等. 计及变压器铁芯饱和的LCC-HVDC输电系统谐波不稳定性评估与应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 85-91.
LIU Dui, LI Xiaohua, CAI Zexiang, et al. Harmonic instability evaluation of LCC-HVDC transmission system considering transformer core saturation and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 85-91.
- [5] ZHANG S, YAO C G, ZHAO X Z, et al. Improved flux-controlled VFCV strategy for eliminating and measuring the residual flux of three-phase transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1237-1248.
- [6] 兀鹏越,余信,李毅,等. 变压器励磁涌流抑制器工程应用及探讨[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 145-149.
WU Pengyue, YU Xin, LI Yi, et al. Engineering application of transformer excitation inrush suppressor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 145-149.
- [7] TSUTADA H, HIRAI T, KOHYAMA H, et al. A basic study of controlled closing for transformers with residual flux[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2003, 123(6): 765-771.
- [8] 王阳,许志红. 基于组合式开关的三相变压器励磁涌流抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 99-106.
WANG Yang, XU Zhihong. Inrush current suppression strategy of three-phase transformer based on combined-switches[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 99-106.
- [9] 戈文祺,汪友华,陈学广,等. 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 10-16.
GE Wenqi, WANG Youhua, CHEN Xueguang, et al. Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 10-16.
- [10] 任于展,武仕朴,汪友华,等. 基于暂态电流差极值的电力变压器剩磁测量方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1088-1097.
REN Yuzhan, WU Shipu, WANG Youhua, et al. Residual flux measurement method of power transformer based on extreme value of transient current difference[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1088-1097.
- [11] 李海涛,刘北阳,滕文涛,等. 基于可变合闸角的变压器励磁涌流抑制方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 70-78.
LI Haitao, LIU Beiyang, TENG Wentao, et al. Research on inrush current suppression of transformer based on changeable closing angle[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 70-78.
- [12] 李伟,黄金,方春恩,等. 基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 9-13.
LI Wei, HUANG Jin, FANG Chun'en, et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 9-13.
- [13] 邢运民,罗建,周建平,等. 变压器铁心剩磁估量[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 169-172.
XING Yunmin, LUO Jian, ZHOU Jianping, et al. Estimation of remanence in transformer core[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 169-172.
- [14] 李冠群,叶华,宾子君. V/f控制MMC带换流变压器空载充电发生高频振荡的机理分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 50-59.
LI Guanqun, YE Hua, BIN Zijun. High-frequency oscillation mechanism analysis of V/f controlled modular multilevel converter charging with converter transformer under no-load condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 50-59.
- [15] 陈川江,方春恩,曾俊龙,等. 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 82-88.
CHEN Chuanjiang, FANG Chun'en, ZENG Junlong, et al. Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 82-88.
- [16] 柳永妍,乐健,李琼林,等. 电容式电压互感器谐波测量误差研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 167-174.
LIU Yongyan, LE Jian, LI Qionglin, et al. Research on harmonic measurement error of CVT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 167-174.
- [17] 黄然,周仿荣,张恭源,等. 电容式电压互感器传变特性研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 158-163.
HUANG Ran, ZHOU Fangrong, ZHANG Gongyuan, et al. Research of CVT transient response[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 158-163.
- [18] 吴小丹,殷子寒,朱海勇. 分相级联大容量高压直流变压器拓扑及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 137-148.
WU Xiaodan, YIN Zihan, ZHU Haiyong. Topology and control strategy of split-phase cascaded high-voltage large-capacity DC transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 137-148.
- [19] 袁炜颖,甘萌莹,袁建生. 通过改变外电路电容减小变压器剩磁的方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2997-3004.
YUAN Weiyang, GAN Mengying, YUAN Jiansheng. Method of reducing transformer remanence by changing capacitance of external circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2997-3004.
- [20] FANG S H, NI H M, LIN H Y, et al. A novel strategy for reducing inrush current of three-phase transformer considering residual flux[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4442-4451.

作者简介:

韩平平(1981—),女,副教授,博士,主要研究方向为可再生能源并网技术(E-mail: LH021211@163.com);

王焱(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电建模与控制(E-mail: hfutwangyan@163.com)。

(编辑 王欣竹)

(下转第109页 continued on page 109)

and suppression strategy of DFIG-based wind turbine connected to grid via series compensated lines[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.

作者简介:

赵永光(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制(E-mail: 1151537750@qq.com);

艾力西尔·亚尔买买提(1996—),男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制(E-mail: 22010124@zju.edu.cn);

汤波(1984—),男,高级工程师,博士,通信作者,主要研究方向为新型电力系统规划、新型配电网规划与优化运行、综合能源系统规划等(E-mail: tangbo@shiep.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Analysis of influence of series complement capacitor on converter oscillation dominated by phase locked loop

ZHAO Yongguang¹, YAERMAIMAITI Ailixier², TANG Bo¹, SUN Xiufeng¹, MA Junchao³, XIN Huanhai²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: Series capacitor compensation technology is extensively utilized in power grids. However, the stability of phase locked loop-based inverter is significantly affected by the dynamic characteristics of series complement capacitor. To analyze this influence, an impedance model of the inverter connected to series complementary system is established in polar coordinate system, and the generalized impedance criterion considering series capacitor is derived. On this basis, the dynamic coupling between series complement capacitor and phase locked loop, along with the corresponding stability mechanism are elucidated. Furthermore, the effects of grid strength, series complement capacitor degree, and variations of phase locked loop parameters on system stability are analyzed. To enhance the stability of the inverter connected to series complementary system, a phase locked loop parameter design method based on the generalized impedance criterion is proposed. The research show that the inverter connected to series complementary system tends to exacerbate sub-synchronous oscillation problem under weak grid conditions, and increasing the proportional gain of phase locked loop can significantly enhance the stability of series complementary grid connection system.

Key words: series complementary grid connection system; electric converters; generalized impedance criterion; phase locked loops; subsynchronous oscillation

(上接第95页 continued from page 95)

Calculation method of converter transformer residual flux considering CVT output characteristics

HAN Pingping¹, WANG Yan¹, CHEN Yuxiang¹, CHEN Zhong², HU Di²

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: When the ultra high voltage converter transformer is closed without load, its residual flux changes the size and direction of the iron core magnetic flux, which easily causes serious inrush current, leading to the converter transformer failing to operate normally. For calculating the converter transformer residual flux, it is analyzed that the error in the capacitor voltage transformer (CVT) output data is caused by the change of system frequency. Correction is made based on the error formula and a calculation method of the converter transformer residual flux considering the CVT output characteristics is proposed based on the voltage integration method. The relevant simulation models are built in PSCAD / EMTDC, the opening experiments are conducted in the positive and negative voltage peaks of the Y and D bridge converter transformers, and the converter transformer residual flux is determined based on the proposed calculation method. The comparative experiment of phase selection closing is completed using pre-correction, post-correction and monitored converter transformer residual flux. The experimental results show that the proposed method can effectively calculate the residual flux of converter transformer, providing a reference basis for the suppression of inrush current.

Key words: converter transformer; residual flux; CVT; voltage integration method; phase selection closing

附录 A

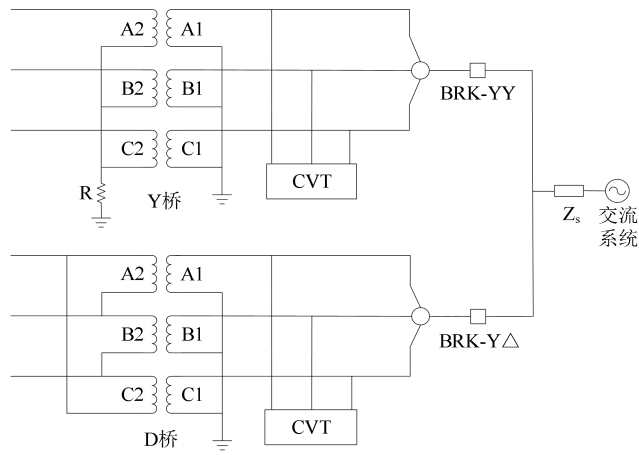


图 A1 特高压换流变合闸拓扑结构图

Fig.A1 Topological structure diagram of UHVDC converter transformer closing

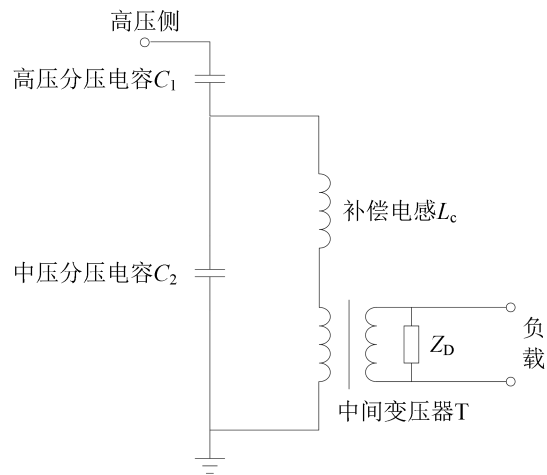
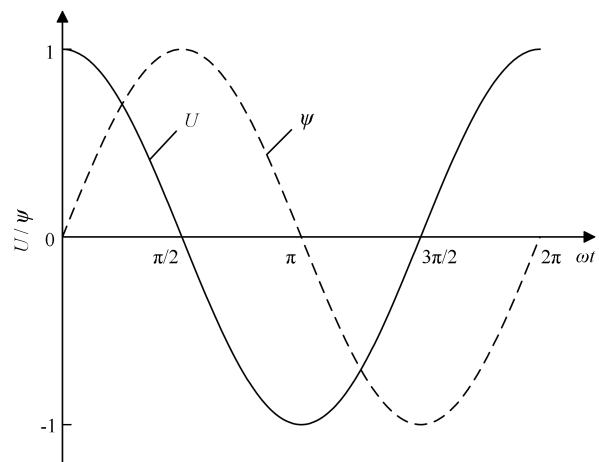


图 A2 CVT 原理图

Fig.A2 CVT schematic diagram

附录 B



注：电压 U 和磁链 ψ 均为标么值。

图 B1 电压和磁链变化关系

Fig.B1 Voltage and magnetic linkage variation relationship

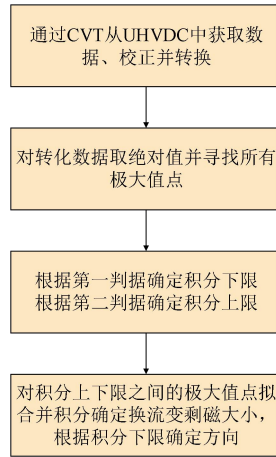


图 B2 电压积分法测算换流变剩磁流程图

Fig.B2 Flow chart for measuring converter residual flux by voltage integral method

附录 C

表 C1 换流变铭牌参数

Table C1 Nameplate parameters of converter transformer

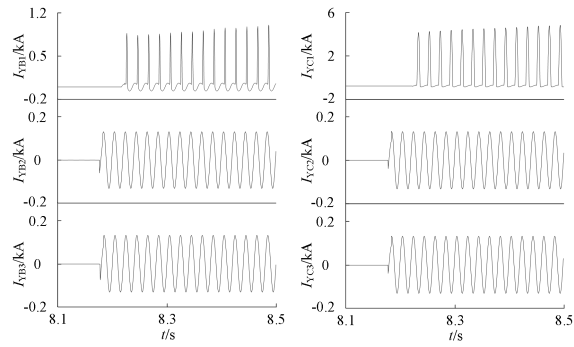
铭牌参数	Y 桥换流变	D 桥换流变
额定容量	587.1 MV·A	587.1 MV·A
额定电压变比	510 kV/230 kV	510 kV/395 kV
频率	50 Hz	50 Hz
空载损耗	0.044 7 p.u.	0.044 7 p.u.
漏抗	0.2 p.u.	0.2 p.u.
接线组别	Y-Y	Y-Δ

附录 D

表 D1 校正前、校正后、监测剩磁及选相合闸时刻

Table D1 Before and after correction, monitoring residual flux and phase selection closing time

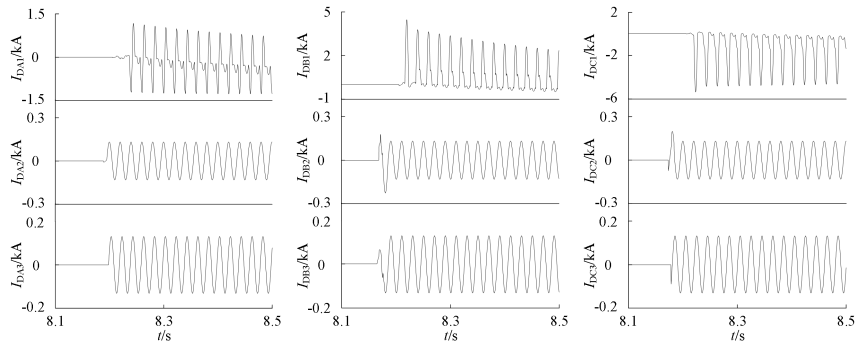
类型	校正前/p.u.	校正后/p.u.	监测值/p.u.	校正前合闸时刻/s	校正后合闸时刻/s	监测值合闸时刻/s
Y/A	0.508 9	0.617 6	0.618 9	8.207 0	8.169 8	8.168 7
Y/B	-0.444 0	-0.52 54	-0.526 4	8.213 7	8.176 8	8.177 3
Y/C	-0.064 9	-0.092 2	-0.092 5	8.220 3	8.177 8	8.177 9
D/A	0.310 8	0.331 8	0.334 3	8.232 8	8.190 8	8.198 0
D/B	-0.306 6	-0.324 8	-0.327 2	8.206 1	8.168 9	8.165 0
D/C	-0.004 2	-0.007 0	-0.007 1	8.212 8	8.170 8	8.178 0



注： I_{YB1} 、 I_{YB2} 、 I_{YB3} 分别表示利用校正前、校正后和监测剩磁计算的合闸时刻合闸后 Y 桥 B 相励磁涌流大小； I_{YC1} 、 I_{YC2} 、 I_{YC3} 分别表示利用校正前、校正后和监测剩磁计算的合闸时刻合闸后 Y 桥 C 相励磁涌流大小。

图 D1 Y 桥换流变 B、C 相励磁涌流

Fig.D1 Phase-B and phase-C inrush current of Y-bridge converter transformer



注： I_{DA1} 、 I_{DA2} 、 I_{DA3} 、 I_{DB1} 、 I_{DB2} 、 I_{DB3} 、 I_{DC1} 、 I_{DC2} 、 I_{DC3} 分别表示利用校正前、校正后和监测剩磁计算的合闸时刻合闸后 D 桥 A、B、C 三相励磁涌流大小。

图 D2 D 桥换流变励磁涌流

Fig.D2 Inrush current of D-bridge converter transformer