

计及剩磁、合闸电阻及选相合闸策略的 励磁涌流仿真评估方法

周波,常晓青,张华,魏巍,史华勃

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

摘要:长链式薄弱电网中,变压器空载励磁涌流是制约电力系统和用户设备安全稳定运行的重要因素。首先针对剩磁评估、合闸电阻及选相合闸技术相结合的励磁涌流综合抑制措施进行介绍,并详细分析3种措施相互配合对励磁涌流的影响。最后,基于PSCAD仿真平台,搭建藏中联网工程电磁暂态模型并提出剩磁准确添加方法。空充主变压器励磁涌流试验结果与仿真结果高度吻合,充分验证了所提励磁涌流仿真评估方法的有效性。

关键词:励磁涌流;剩磁;合闸电阻;选相合闸;仿真评估

中图分类号:TM41 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2018)06-0037-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.06.009

Evaluation Method for Inrush Current Simulation Considering Residual Flux, Closing Resistance and Phase – controlled Switching Strategy

Zhou Bo, Chang Xiaoqing, Zhang Hua, Wei Wei, Shi Huabo

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The inrush current of transformer has a major influence on the stability and safety of power grid and load equipment. The evaluation of residual flux, together with the application of closing resistance and phase – controlled switching strategy, has formed a comprehensive suppression measure with inrush current, which is explained in detail. Also, how the coordination among the three methods mentioned above can impact on inrush current is given. Finally, based on PSCAD, the transient simulation model of Mid – Tibet interconnection project is established with a careful consideration of residual flux to evaluate the inrush current. Considering the amplitude and change trend of inrush current, the experiment result is a high coincidence with that of the simulation result. And the effectiveness of the proposed evaluation method is verified.

Key words: inrush current; residual flux; closing resistance; phase – controlled switching strategy; simulation evaluation

0 引言

变压器空载合闸投运时,由于铁心材料的非线性,在暂态直流偏置磁链作用下,易进入饱和区,形成励磁涌流。较大的励磁涌流不仅可能诱发变压器保护误动,还会产生较大的机械应力,造成变压器绕组变形,影响变压器使用寿命。同时,励磁涌流含有丰富的谐波分量,其在电网中的传播有可能引起节点电压谐波畸变,对电能质量敏感装置运行产生不利影响。此外,在长链式电网中,谐波传递还易引发谐振过电压,对用户设备安全运行构成威胁。在电网相对薄弱地区,鉴于励磁涌流的危害,已广泛采用

相应励磁涌流抑制措施,主要包括消磁、加装合闸电阻和选相合闸技术。主变压器合闸励磁涌流的大小也取决于抑制措施的实施效果。

目前,已有大量学者对励磁涌流开展研究,取得了丰富的成果。文献[1]提出一种基于磁滞回线的消磁方法,但其有效性尚缺乏实际的量化佐证。文献[2]提出基于Preisach模型的剩磁计算方法,但其实现需依托于大量实验数据的复杂运算。文献[3]给出一种基于电压积分法的剩磁评估方法,而该方法高度依赖于电压互感器的量测精度。文献[4]提出一种基于延时合闸策略的选相合闸技术,但由于开关动作离散性和预击穿的影响,其有效性会受到极大影响。文献[5]提出一种计及剩磁的励磁涌流仿真方法,但其施加剩磁的方法和作用效果缺乏试验验证。

下面首先分析了励磁涌流产生的机理,而后介绍了励磁涌流仿真评估约束条件,包括基于电压积分法的剩磁评估方法、主变压器断路器加装合闸电阻的涌流抑制措施和基于延时合闸的选相合闸技术。接着,阐述了剩磁、合闸电阻和延时合闸策略的配合关系。最后,基于 PSCAD 仿真平台,提出剩磁施加方法,并基于现场实测结果开展励磁涌流仿真评估方法验证,同时也为消磁效果评价提供了一种方式。

1 励磁涌流产生机理

变压器空载合闸时,由于磁链守恒定律,铁心工作磁链会产生暂态直流偏置(偏置大小取决于合闸相角)^[4]。以单相变压器为例,假设合闸时刻变压器铁心剩磁为 ψ_r ,外施电压有效值为 U_m ,角频率为 ω ,初始相角为 δ 。采用电动机惯例,则合闸后回路电压方程满足:

$$\begin{cases} \psi = L \cdot i \\ \frac{d\psi}{dt} + R \cdot i = U_m \sin(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: L 为回路电感(包含变压器漏感和励磁电感); R 为回路电阻(包含合闸电阻、变压器绕组电阻和励磁支路等效电阻)。

因此,变压器铁心磁链满足:

$$\psi = -\psi_m \cos(\omega t + \delta) + (\psi_r + \psi_m \cos\delta) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2)$$

式中:

$$\psi_m = \frac{LU_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (3)$$

铁心工作磁链的偏置易造成铁心进入饱和区,导致激磁回路电感减小。在变压器端口外加工频交流源的作用下,励磁电流上升,形成励磁涌流。以图 1 合闸角度和励磁引起的暂态磁链变化为例说明,正常情况下电网虚拟磁链跟随电网电压变化,且滞后 90° 。若变压器在电压 72° 时合闸,则变压器将产生正向暂态直流偏置,其磁链工作曲线整体上移 0.31 p.u. ;若继续考虑 40% 正向磁链,则该曲线将继续上移 0.4 p.u. (实际中由于变压器磁化曲线的非线性,偏置后的磁链曲线表现为平顶波)。

设定变压器拐点磁链为 1.1 p.u. 。随着电压变化,磁链超出 1.1 p.u. 时即进入饱和区产生励磁涌流,而后又退出饱和,涌流消失,回归正常励磁电流。因此励磁涌流呈现出间断尖顶的特点,其宽度与处于饱和区的时间相关,而最大值出现在磁链最大时刻。

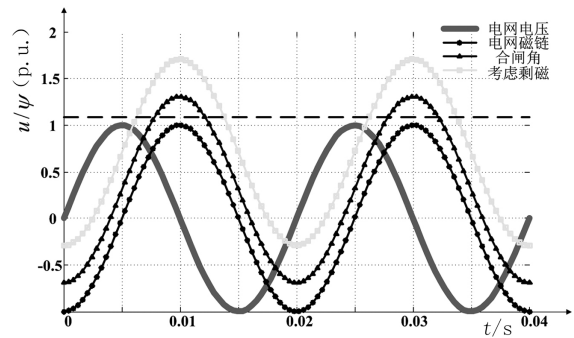


图 1 合闸角度和剩磁引起的暂态磁链变化

2 励磁涌流仿真评估约束条件

2.1 基于电压积分法的剩磁评估方法

若不考虑 CVT(电容式电压互感器)传变特性影响,则变压器剩磁可由断路器开断前后电压波形积分获取,如式(4)所示。

$$\psi_r = \psi_r(0) + \int u_T dt \quad (4)$$

式中: $\psi_r(0)$ 为初始磁链; u_T 为变压器 CVT 瞬时电压。为保证开断前磁链初值为 0,应自电压最大值处开始积分。考虑到开断后断路器断口电容耦合作用、CVT 测量元件误差及变压器杂散电容等因素影响,开断一段时间后 CVT 测量结果不可信,因此电压测量积分终点宜选取为开断后约 1 s 左右,此时,电压暂态衰减过程基本结束。

以藏中联网工程巴塘站 4 号主变压器第 4 次开断为例,开断前后主变压器电压波形和磁链波形如图 2 所示。开断后约 0.85 s ,变压器 A、B、C 三相剩磁分别为 -28.3% 、 -6.4% 和 27.5% 。

2.2 合闸电阻

带合闸电阻断路器装置示意如图 3 所示,其中 R_1 为合闸电阻, D_1 为辅助触头, D_2 为主触头。合闸命令发出后, D_1 先合闸,合闸电阻投入并作用一段时间,而后 D_2 合闸,合闸电阻旁路退出运行, D_1 再分闸。

目前 500 kV 断路器合闸电阻设计值约为 1000 ~ 1500 Ω。受制造工艺和热容量等因素限制,其投入时间普遍在 8 ~ 12 ms。合闸电阻的投入不仅有助于增大暂态过程励磁回路阻抗,限制励磁涌流,也可增大系统阻尼,加快励磁涌流衰减。

小为 A 相磁链一半,相位相反。根据磁链守恒定律,此时合闸 B、C 相涌流将最小。

3 配合关系

采用延时合闸策略时, A 相首合后,该相磁链工作曲线与合闸角度及剩磁大小、方向密切相关,也是决定励磁涌流大小的关键。以 A 相电压正半周为例(负半周的关系同理), A 相开关的理想合闸相角为 90°,考虑到开关动作离散性和预击穿特性的影响,其可能的合闸角将落在 90° ± 90° 的区间上,对应为正半周,存在一个上升沿和下降沿。

同样以图 1 为例说明,采用电动机惯例,设定 A 相参考的电网基准电压在 t = 0 时刻上升沿过零点。此时,如果在电压上升沿合闸,将产生正向的暂态直流偏置磁链,若此时剩磁方向为正,将加剧合闸后变压器 A 相工作磁链的正向偏移,引起励磁涌流的增加;若剩磁方向为负,将抵消掉部分变压器 A 相工作磁链的正向偏移,进而减小励磁涌流。

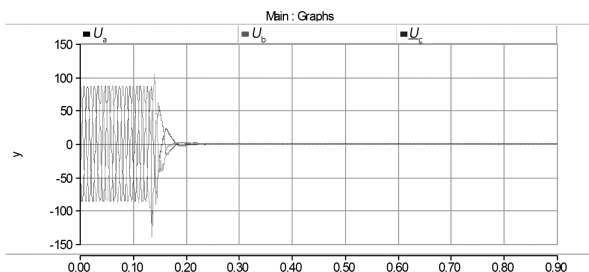
若在电压下降沿合闸,将产生负向的暂态直流偏置磁链,若此时剩磁方向为正,将抵消掉部分变压器 A 相工作磁链的正向偏移,进而减小励磁涌流;若剩磁方向为负,将加剧合闸后变压器 A 相工作磁链的正向偏移,引起励磁涌流的增加。

而如果暂态直流偏置磁链和剩磁叠加后使得 A 相工作磁链正向偏移,则涌流峰值出现的时刻将在合闸后 A 相电压的下一个下降沿过零点,该点与初始合闸点的时间差在 5 ~ 10 ms;若叠加后使得 A 相工作磁链负向偏移,则涌流峰值出现的时刻将在合闸后 A 相电压的下一个上升沿过零点,该点与初始合闸点的时间差在 10 ~ 15 ms。

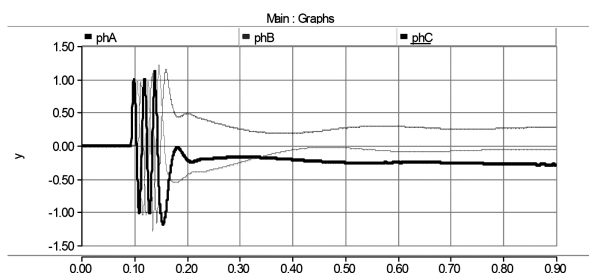
因此,考虑到合闸电阻投入时间限制,为保证在磁链绝对值最大值处合闸电阻的有效投入,限制空充励磁涌流,应首选在 A 相上升沿合闸。同时考虑到开关动作离散性(约为 ± 1 ms),合闸时刻宜调整为 72° 及以下,具体可视剩磁大小和方向定。

4 考虑剩磁的仿真分析

藏中联网工程中 500 kV 主变压器大量采用了合闸电阻和选相合闸相结合的涌流抑制措施。同时,500 kV 主变压器首次空充前均采取了消磁措



(a) 电压曲线



(b) 磁链曲线

图 2 开断前后变压器电压和磁链变化曲线

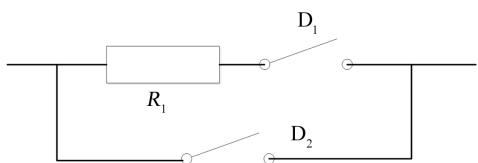


图 3 带合闸电阻断路器装置

2.3 延时合闸策略

选相合闸技术是限制励磁涌流的重要措施,而考虑到变压器铁心三相剩磁不同,常采用延时合闸策略。以首合变压器 A 相为例(后续分析均以 A 相作为首合相),该策略在 A 相合闸后(若不考虑剩磁,最佳合闸点为电网电压 A 相最大值处),延时 3 ~ 4 个周期后在 A 相电压过零点同时合 B、C 两相。原因在于变压器普遍采用 Y/Y/D 接法, A 相高压侧合闸后在其低压侧绕组感应电压,由于低压侧绕组角接,变压器 B、C 两相绕组进行分压再感应回该两相的高压侧,使得变压器 B、C 两相高压侧电压瞬时值均为 A 相电压的一半,相位相反。虽然变压器 B、C 两相剩磁不同,但感应电压作用 3 ~ 4 个周期后,其磁链均衡化,大小为 A 相磁链一半,相位相反。而在 A 相电压过零时刻,电网侧 B、C 相虚拟磁链大

施,后续开断录波也为剩磁评估创造了条件。为评估藏中联调网调试和运行期间存在的励磁涌流风险,基于 PSCAD 搭建了藏中联网工程东线电磁暂态仿真模型,其结构如图 4 所示。图中木里、水洛、乡城、巴塘、芒康均为 500 kV 变电站,四川侧主网在 500 kV 月城站做等值,乡城、水洛和木里变电站 220 kV 侧上水网均搭建了详细模型并调整为与充电时段对应的运行方式。

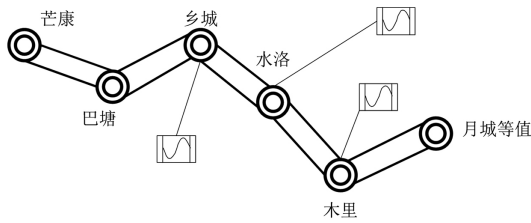


图 4 仿真网架

PSCAD 仿真平台提供了变压器饱和模型,而剩磁的准确施加对于励磁涌流仿真分析具有重要意义。

根据式(1) 电网电压和电网虚拟磁链分别满足:

$$\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t + \delta) \\ \psi = \psi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta) \end{cases} \quad (5)$$

假定空充主变压器操作前某一稳态时刻 T_0 , 电网电压 A 相处于上升沿过零点, 则电网电压 A 相初始相角 δ 满足:

$$\delta = -\omega T_0 \quad (6)$$

PSCAD 中剩磁的施加依靠外加电压源作用, 通过控制外加电源的幅值和相位控制首合相剩磁大小, 在合闸时刻切除外加电源而接入系统电压, 设外施电压源满足:

$$u_{rem} = U_r \sin(\omega T\alpha + \delta) \quad (7)$$

式中: U_r 为外加电源幅值; α 为外加电源相对于电网电压的相位差。

为使 A 相剩磁稳定, 需使合闸时刻外加电源 A 相虚拟磁链正好处在对应方向的峰值, 若剩磁为负, 则为负峰值, 反之亦然。假设剩磁为某一值 X , 则要求剩磁满足:

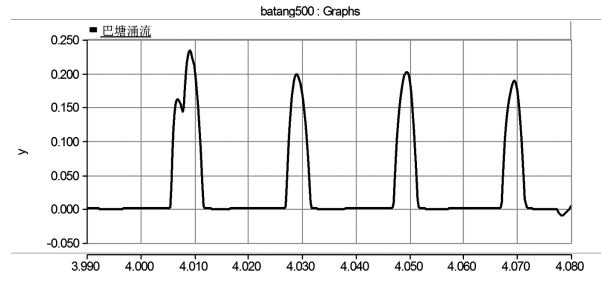
$$\psi_r = |X| \sin(\omega T - \frac{\pi}{2} + \alpha + \delta) = X \quad (8)$$

据此可得

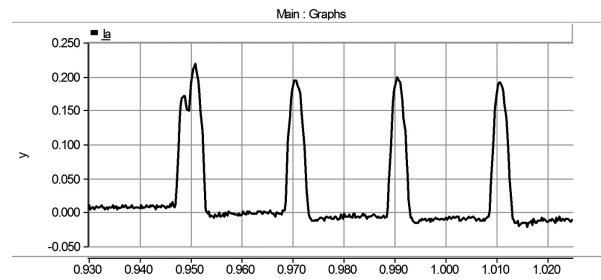
$$\alpha = \arcsin(\frac{X}{|X|}) + \frac{\pi}{2} - \omega T - \delta \quad (9)$$

以巴塘 4 号主变压器第 4 次合闸为例, 断路器合闸电阻为 1500 Ω , A 相合在过零点后 0.1 ms, 合闸电

阻投入时间为 8.6 ms; B 相延时 80 ms 后, 合在 A 相过零点前 2.1 ms, 合闸电阻投入时间为 10.9 ms; C 相延时 80 ms 后, 合在 A 相过零点前 2.1 ms, 合闸电阻投入时间为 10.9 ms。根据第 4 次分闸后剩磁评估结果, A 相剩磁 -23%。由于第 4 次空充时, 充电断路器为首合, 动作时间按照厂家提供的静态试验值整定, 与实际存在较大差别, 造成 A 相基本合在了上升沿过零点。计算获取外加电源相角差为 12.6°。



(a) 仿真计算励磁涌流波形



(b) 实测励磁涌流波形

图 5 励磁涌流评估仿真和实测对比

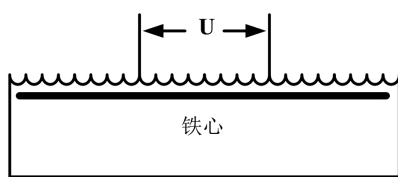
仿真中 A 相励磁涌流第 1 个波峰峰值为 231 A, 实测中 A 相励磁涌流第 1 个波峰峰值为 218 A, 仿真相对实测误差仅为 6%。此外, 两者波形变化趋势保持高度一致, 充分证明了基于电压积分法的剩磁评估方法和 PSCAD 变压器饱和模型的可用性, 以及所提剩磁施加方法的正确性, 为变压器合闸励磁涌流评估以及主变压器消磁效果评价提供了一种手段。

5 结 语

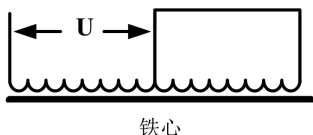
针对长链式薄弱电网励磁涌流防控需要, 在计及剩磁、合闸电阻及延时合闸策略的基础上, 分析了三者之间配合关系对励磁涌流的影响, 进而给出了优化的合闸策略。同时, 基于 PSCAD 平台搭建了藏中电网详细电磁暂态计算模型, 提出用于励磁涌流评价的剩磁施加方法, 仿真和实测对比高度吻合, 充

(下转第 74 页)

缘能够承受的 85 ℃ 之内。



(a) 具有 4 个端子的 CT 加热方式



(b) 具有 3 个端子的 CT 加热方式

图 5 交流短路加热接线

采用电加热的优点有: 1) 可以从线圈内部进行加热, 对内部受潮的干燥效果较好; 2) 线圈整体受热较为均匀, 且温度可控。

4 进水封堵措施

针对现场发现的进水渠道采取有针对性的封堵措施:

1) 将二次接线盒与 CT 箱体通道以及二次电缆护套在进入二次接线盒的地方采取密封措施;

2) 更换二次电缆护套, 并采用 U 形布置, 并在 U 形管的下部开口, 便于雨水漏出;

3) 在图 3 所示的夹层中的螺栓、呼吸孔下部、电流互感器箱体的连接接缝处采用打胶的方式密封。

(上接第 40 页)

分验证了励磁涌流仿真评估方法的准确性, 也为变压器消磁效果评价提供了一种手段。

参考文献

- [1] 张晓洁, 杨勃, 陈垒, 等. 一种基于磁滞回线的变压器剩磁计算方法研究[J]. 变压器, 2015, 52(10): 11-13.
- [2] 乌云高娃. 变压器励磁涌流的分析与控制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [3] 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.
- [4] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 81-84.

5 结 语

通过对本次缺陷的分析和处理得出以下结论:

1) 该形式的外置式电流互感器在户外使用时, 由于其结构形式极易造成外部水分进入互感器腔体内部, 从而导致互感器线圈受潮, 安装时应加强其密封, 避免雨水进入;

2) 当电流互感器线圈受潮时, 不用盲目地更换线圈, 可以采取热风和电加热的方法进行干燥处理。

参考文献

- [1] 冯昌远. GIS 的运行经验和现场试验[J]. 高压电器, 2000, 36(1): 49-53.
- [2] 傅旭华. 组合式高压电器(HGIS)的特点浅析[J]. 浙江电力, 2006, 25(3): 67-68.
- [3] 鲁旭臣, 李爽, 毕海涛, 等. 辽宁电网 GIS 与 HGIS 运行可靠性和实用性分析[J]. 东北电力技术, 2014, 35(9): 20-22.
- [4] 印华, 姚强, 王勇, 等. 一起 GIS 事故的分析与处理[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 122-123.
- [5] 电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB 50150-2016[S]. 2016.

作者简介:

唐 静(1988), 硕士研究生、工程师, 现从事综合计划、物资计划、资金项目管理工作。

(收稿日期: 2018-08-30)

- [5] 黄金, 方春恩, 李天辉, 等. 计及剩磁的变压器励磁涌流的仿真研究[J]. 变压器, 2009, 46(11): 40-43.

作者简介:

周 波(1989), 工程师, 主要从事电力系统稳定与控制技术和新能源发电控制技术研究;

常晓青(1965), 高级工程师, 主要从事电力系统稳定与控制技术研究;

张 华(1985), 高级工程师, 主要从事电力系统稳定与控制技术研究;

魏 巍(1984), 高级工程师, 主要从事电力系统稳定与控制技术研究;

史华勃(1987), 工程师, 主要从事电力系统稳定与控制技术研究。

(收稿日期: 2018-08-24)