

超高压输电系统传递过电压的 电磁暂态过程及特性分析

刘 念¹, 谢 驰², 滕福生¹

(1. 四川大学 电气工程系, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 测控系, 四川 成都 610065)

摘要: 针对厂站操作过电压对大型发电设备的冲击问题, 重点对超高压开关站中的操作过电压通过升压电力变压器传递的暂态过电压进行分析, 研究了超高压输电系统传递过电压的电磁暂态过程及特性, 分析表明, 在升压变压器传递暂态过电压过程中, 电磁感应过电压和静电感应过电压在升压变压器的低压侧叠加, 共同对大型发电机绝缘安全构成威胁。分析了传递过电压对大型发电机造成的冲击程度, 并对传递过电压的电磁暂态过程进行了仿真试验, 其传递过电压所形成冲击电压幅值高达约 2 p.u.。仿真表明超高压开关站的操作冲击波通过升压变压器冲击大型水轮发电机组。

关键词: 传递过电压; 电磁暂态过程; 特性分析; 仿真试验

中图分类号: TM 713

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0005-03

0 引言

大型水电站的电能主要是通过超高压远距离输电系统向远方输送。在大型水电站中, 大型水轮发电机经过高压断路器和升压电力变压器与超高压 500 kV 远距离输电线路相联接。联接超高压输电系统的超高压开关站中的操作过电压冲击波会通过由大型升压变压器、高压电缆、高压断路器等组成的通路传递到大型水轮发电机的机端^[1-2]。由于大电网电压等级越高, 操作过电压对大容量发电机内部造成的绝缘危害就越严重。一旦绝缘严重损坏, 就会造成大容量发电机退出运行, 甚至造成系统大范围停电。实际运行表明, 虽然超高压大电网中的电气主设备采用了过电压保护装置, 但过电压仍然侵入电气设备内部造成主绝缘损伤或击穿。尤其在美加大电网事故以后, 世界各国对电气主设备的安全运行高度重视^[3-4]。因此, 研究超高压输电系统传递过电压的电磁暂态过程及特性, 预测大电网操作过电压冲击危害, 以及评估大容量发电机在操作过电压冲击下的安全状态, 对电气主设备可靠运行具有重要意义。

另外, 现代新型高压断路器的开断速度极快, 使得厂站电气网络系统从一种稳定工作状态通过快速的电磁振荡转变到另一种稳定工作状态, 由此产生强烈的操作过电压。针对联接超高压输电系统的超高压开关站中的操作过电压通过升压电力变压器传递的暂态过电压问题, 本文研究了超高压输电系统传递过电压的电磁暂态过程及特性, 分析了传递过电压对大型发电机造成的冲击程度, 并通过仿真试验

表明大型发电机已经受到来自超高压输电系统传递过电压的强烈冲击^[5-9]。

1 开关站操作过电压

大型水电站中的高压开关站一方面与发电厂相联, 另一方面与超高压输电线路相联, 通过分合空载输电线路, 控制电能的传输。

当断路器合闸空载线路瞬间, 断路器触头间隙产生电弧, 并进入电磁过渡阶段。合闸空载线路所产生的电磁过渡过程是一个十分复杂的电磁暂态过程, 除了受线路参数、网络状态等因素影响外, 超高压断路器的工作特性将尤其对其产生较大的影响。实际上, 断路器合闸过程包括 2 个瞬时阶段: 第 1 阶段为预击穿阶段, 断路器触头虽然未接触, 但触头间隙已预先击穿, 并开始产生越来越强的电弧, 这个阶段是一个极高频的电磁振荡过程; 第 2 阶段为触头接合, 电弧逐步熄灭, 这又是一个过渡阶段。在高压断路器合闸时, 在高压开关站上的操作过电压冲击波将通过升压变压器到达大型水轮发电机^[10-12]。

切断空载线路是超高压开关站中最常见的操作之一。对于空载线路而言, 通过断路器的电流一般为几十安到几百安的容性电流。超高压开关站切断空载线路时, 断路器实际分闸必须经过 2 个阶段。第 1 阶段为触头开始分离瞬间, 并产生电弧, 使原电路参数发生突变, 但是原电路仍然未开断。在此阶段将产生高频电磁振荡, 其振荡频率由回路参数确定。第 2 阶段是触头间的电弧熄灭, 截流成功。与合闸空载线路相似, 发电机定子绕组受到来自高压开关站切断空载线路的过电压冲击。

然而, 大容量的升压变压器对发电机起到了一定

的保护作用。升压变压器一方面与大型水轮发电机组成发电单元,发电机通过它向超高压输电系统传送电能;另一方面,它采用电磁耦合形式,将大型发电机与超高压输电系统隔离。但是,当过电压作用于升压变压器的高压线圈时,除了高压线圈本身产生不均匀分布的振荡过电压外,同时还在低压线圈上感应产生一定大小的传递过电压。操作过电压冲击波的确会通过升压变压器传播到大型水轮发电机的定子绕组上,尽管其冲击波的幅值和陡度有所下降。这种传递过电压将超过联接变压器低压侧的发电机绝缘水平,造成发电机绝缘击穿事故。传递暂态过电压现象实质上是由于在升压变压器内部的电磁感应和静电感应的综合作用所产生的。因此,这种传递暂态过电压为静电感应过电压和电磁感应过电压的合成。由此可见,发电单元存在着传递过电压现象,超高压输电线路上的操作过电压冲击波对大型发电机绝缘安全构成的威胁问题是不可避免的。

图 1 为分析升压变压器高压侧受到高压开关站操作电压冲击波作用时产生电磁感应过电压的简化等效电路。 $L_{1\sigma}$ 和 $L_{2\sigma}$ 分别为升压变压器高、低压线圈的漏电感, $r_{1\sigma}$ 和 $r_{2\sigma}$ 分别为高、低压线圈的电阻, L_m 为激磁电感, r_m 为激磁电阻, K 为变压器变比, $u_1(t)$ 为进入高压侧的操作过电压冲击波。

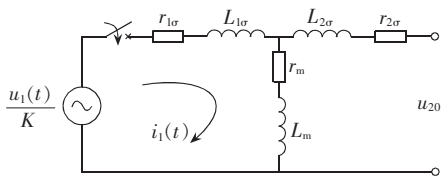


图 1 变压器低压侧电磁感应的简化等效电路

Fig.1 Simplified equivalent circuit of electromagnetic induction at the low voltage side of the transformer

设升压变压器低压侧空载,而高压侧有操作冲击波电压 $u_1(t)$ 侵入,其值等效于低压侧的 $u_1(t)/K$ 。从图 1 得暂态电路方程

$$(L_{1\sigma} + L_m) \frac{di_1}{dt} + (r_{1\sigma} + r_m)i_1 = \frac{u_1(t)}{K} \quad (1)$$

$$i_1(0_+) = 0$$

因此,变压器高压侧线圈中的浪涌电流为

$$i_1(t) = \frac{u_1(t)}{K(r_{1\sigma} + r_m)} - \frac{u_1(0_+)}{K(r_{1\sigma} + r_m)} e^{-\frac{r_{1\sigma} + r_m}{L_{1\sigma} + L_m} t} \quad (2)$$

因 $r_m \gg r_{1\sigma}$, $L_m \gg L_{1\sigma}$, 所以高压侧浪涌电流近似为

$$i_1(t) = \frac{1}{K r_m} \left[u_1(t) - u_1(0_+) e^{-\frac{r_m}{L_m} t} \right] \quad (3)$$

因此,升压变压器低压侧电磁感应的传递过电压为

$$u_{20}(t) = r_m i_1(t) + L_m \frac{di_1(t)}{dt} = \frac{1}{K} \left[u_1(t) + \frac{L_m}{r_m} u_1'(t) \right] \quad (4)$$

从而,电磁感应的传递过电压与高压侧冲击过电压的大小之比为

$$k_{se} = \frac{u_{20}(t)}{u_1(t)} = \frac{\frac{1}{K} \left[u_1(t) + \frac{L_m}{r_m} u_1'(t) \right]}{u_1(t)} =$$

$$\frac{1}{K} \left[1 + \frac{L_m u_1'(t)}{r_m u_1(t)} \right] \times 100 \% \quad (5)$$

式中 $L_m > r_m$ 。

这种传递过电压幅值相对于大型水轮发电机的绝缘安全极限仍然具有很大的威胁性,特别是该冲击波会沿着高压电缆几乎毫无畸变地传播到发电机定子绕组内部,对发电机绝缘造成极大的冲击。

静电感应过电压的幅值主要决定于高、低压线圈对地电容和线圈之间的电容等因素。图 2 为升压变压器高、低压线圈局部电容耦合的等效电路。假设电容参数沿线圈均匀分布, C_1 和 C_2 分别为高、低压线圈对地电容, C_{12} 为高、低压线圈之间的耦合电容。

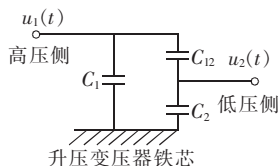


图 2 局部线圈电容耦合等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of coupling capacity for partial coils

由于升压变压器线圈除了有电容参数外,还有电感和电阻参数,可以组成一定的振荡回路。因此,当低压线圈产生感应电压后,还将发生振荡,使这种静电感应过电压成倍升高。当高压开关站操作冲击波进入升压变压器时,将会通过高、低压线圈间的分布电容传递到低压侧,这种情况正如雷电波的静电传递现象一样。其低压侧静电感应过电压与高压侧过电压幅值之比为

$$k_{se} = \frac{u_2(t)}{u_1(t)} \times 100 \% = \frac{C_{12}}{C_2 + C_{12}} \times 100 \% \quad (6)$$

实际上,在升压变压器传递暂态过电压过程中,电磁感应过电压和静电感应过电压在升压变压器的低压侧叠加,共同对大型发电机的绝缘安全构成威胁。

2 仿真试验与理论分析比较

仿真试验主要电气部分由 1 台发电机、1 台变压器以及三相动模线路所组成,而控制部分则由操作控制台、交流接触器和自动空气开关等组成。在图 3 中, QF_1 、 QF_2 为空气自动开关,而 KM 为交流接触器, T 为 Δ/Y 联接的电力变压器,并设置变比 $K=1$ 。变压器左边部分组件用来模拟发电厂部分,而变压器右边组件用来模拟高压开关站部分,并且将在发电机的出线端联接数字式示波器(TDS 210)的探头,完成模拟高压开关站断路器合闸空载线路时过电压冲击波的录波工作。

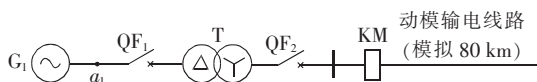


图 3 动模试验线路图

Fig.3 Circuit of dynamic simulation

图 4 为某一时刻 KM 合闸投入空载输电长线时, TDS 210 示波器在发电机 G_1 的 a_1 点记录的操作冲击波形。由图 4 可见,模拟开关站投合空载输电长线所产生的输电系统传递过电压冲击波通过升压变压器向大型发电机传递的过程,其传递过电压所

形成冲击电压幅值高达约 2 p.u.,因此,其危害性不可低估。对于图 4 电压波形中的快速暂态波形段,还可以采用数字式示波器 TDS 210 的视窗区域放大功能,在时间上放大操作过电压冲击波,以便观察分析波形图像的变化趋势,如图 5 所示。

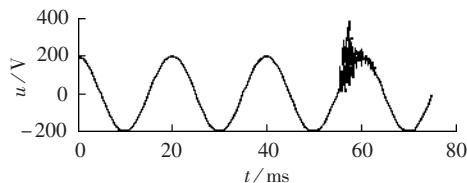


图 4 投入空载长线时发电机 G_1 受到的冲击过电压波形

Fig.4 The waveform of switching surge voltage striking on generator G_1 closed to no-load transmission lines

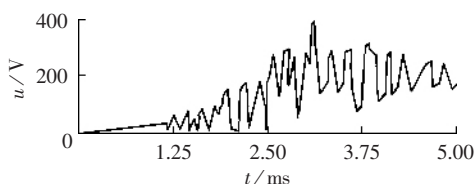


图 5 显示视窗区域中的过电压冲击波形段

Fig.5 The waveform domain of the switching surge voltage displayed on video window

采用电磁暂态分析程序 EMTP (Electro-Magnetic Transient Program) 对动模试验过程进行理论分析,计算通过升压变压器向发电机机端传递的操作过电压。图 6 中虚线为理论分析计算过电压波形,并与实测比较。

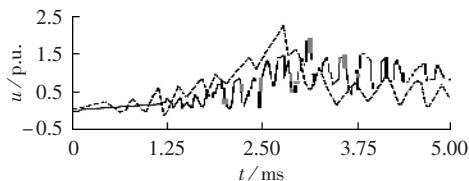


图 6 发电机机端传递过电压冲击波

Fig.6 The surge voltage on generator terminal

由图 6 可见,计算波形与实测波形比较吻合。发电机机端传递过电压实测值 $U_{\text{meas}} = 376.64 \text{ V}$,理论计算值 $U_{\text{cal}} = 442.31 \text{ V}$,相对误差 $\varepsilon = 17.53 \%$ 。

在超高压远距离输电系统中,除了远距离输电长线的容性特征外,再加上超高压的电压等级,使超高压开关站网络贮存着大量的电场能。当合闸空载长线时,必然产生很强的高压开关站操作过电压冲击现象。在实际运行工况中,超高压断路器的分合过程使厂站网络结构与电气参数的变化是产生厂站操作过电压的根源。同时,厂站网络又是传播操作过电压冲击波的路径,其网络拓扑信息状态与厂站操作过电压密切相关。

3 结论

从电磁暂态过程定性地分析了超高压输电系统传递过电压对大型发电机绝缘安全构成的威胁。分

析结果与试验仿真表明大型发电机已经受到来自超高压输电系统传递过电压的强烈冲击,超高压开关站的操作冲击波必然通过升压变压器冲击大型水轮发电机组。

针对大型水电站已设计好绝缘配合的大型发电机组,在线分析它们能否承受实际的超高压输电系统传递过电压冲击,并力求对超高压开关站每次操作过程进行在线实时跟踪监测,以便提出预防性保护与预防性维护策略,这是解决问题的有效办法。

参考文献:

- [1] DICK E P, CHEUNG R W, PORTER J W. Generator models for overvoltage simulations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 728-735.
- [2] GUARDADO J L, CARRILLO V, CORNICK K J. Calculation of inter-turn voltages in machines during switching transients measured on terminals [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1995, 10(1): 87-94.
- [3] SAHA T K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 19(5): 903-917.
- [4] YAMADA T, NARTITA T, SHIODA T. Observation and analysis of lightning surges at substations connected with UHV designed transmission lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 675-683.
- [5] BERTH M, KUNG L, LIMBEEK E F. Switching overvoltage in motor circuits [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(6): 1582-1589.
- [6] TOSHUJISA F. Generator modeling for transformer transfer voltage study [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1193-1198.
- [7] GUARDADO J L, COMICK K J. Calculation of machine winding electrical parameters at high frequencies for switching transient studies [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(1): 33-40.
- [8] GUARDADO J L, COMICK K J. A three-shape model for surge distribution studies in electric machines [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 12(1): 24-31.
- [9] KEERTHIPALA W, MCLAREN P G. The effects of laminations on steep-fronted surge propagation in large A.C. motor coils [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1990, 5(1): 84-90.
- [10] KIM J B, SHIM J W. Switching overvoltage analysis and air clearance design on the 765 kV double circuit transmission system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 381-386.
- [11] METWALL A. Simulation of the impulse response of electrical machines [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 4(4): 861-866.
- [12] GUARDADO J L, COMICK K J. Transient over-voltages in electrical motors during sequential pole closure [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1057-1063.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

刘 念(1956-),男,重庆人,教授,博士,研究方向为电力系统安全监控与故障诊断新技术(E-mail: liunianww@163.com);

谢 驰(1956-),女,四川自贡人,副教授,博士研究生,研究方向为测控技术与智能仪器;

滕福生(1929-),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统安全监控和安全分析新理论。

Electromagnetic transient process and characteristic analysis for over-voltage transferred from extra-high voltage power transmission systems

LIU Nian¹, XIE Chi², TENG Fu-sheng¹

(1. Department of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Department of Test and Control Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to protect the large generation equipment against the switching over-voltage, the law and characteristic of electromagnetic transient process of the over-voltage transferred from the extrahigh power transmission system in power stations are studied, especially the electromagnetic transient process of the over-voltage transferred from the switchgear station through power transformers. During the transient process of the over-voltage transferred through power transformers, the electromagnetic inductive over-voltage and the electrostatic inductive over-voltage are superposed at the low-voltage side of the power transformer, thus endangering the insulation of large generators. The transient process is simulated by tests and its impact on large generator is analyzed, in which 2 p.u. surge voltage has reached. The simulation shows that the switching operation of extra-high voltage switchgear station does strike large generators through power transformers.

Key words: over-voltage transferred; electromagnetic transient process; characteristic analysis; test simulation