

主变空充引起邻近发电机功率摆动分析

张雪松¹, 黄莉², 黄晓明¹

(1. 浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231)

摘要: 针对主变冲击过程中临近发电机功率波动这一现象, 首先对现场取得的录波数据进行了仔细分析。然后, 在等效电路的基础上, 进行了相关理论推导, 揭示了冲击过程中临近发电机有功、无功的变化规律, 并结合 Matlab 仿真工具对此现象进行了建模仿真。最后, 对其主要影响因素进行了仿真实验, 并提出了相应的解决措施。

关键词: 发电机; 功率摆动; 励磁调节器; 励磁涌流

Analysis of the nearby generator power swing in transformer magnetizing

ZHANG Xue-song¹, HUANG Li², HUANG Xiao-ming¹

(1. Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Tongji Vocational College of Science & Technology, Hangzhou 311213, China)

Abstract: In view of the phenomenon of the nearby generator power swing in transformer magnetizing, the site wave recording data is studied in detail firstly. Then based on the equivalent circuit and through correlative theory deduction, the variation rule of the nearby generator's active power and reactive power in the impact process is revealed and the phenomenon is simulated by using MATLAB. At last, the main influence factors are proved by simulation and correlated measures to solve the problem are proposed.

Key words: generator; power swing; excitation regulator; inrush currents

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)02-0016-05

0 引言

电力变压器是电力系统中的重要设备, 其安全运行关系到整个电力系统能否稳定工作, 而电力变压器本身是一个内部模型结构非常复杂的非线性元件, 其在投运及运行过程中的变化行为一直是人们研究的热点^[1-3]。近期, 有关人员发现: 主变冲击过程会造成邻近发电机有功、无功的波动, 如 2006 年 9 月 25 日国华某电厂#4 主变冲击时, 临近某电厂 500 kV 母线电压瞬时下降了 0.8 kV, #2 机励磁电压从 60.7 V 瞬时升到 75.6 V, #2 机最大无功摆动约 74~104 Mvar, 并引起该电厂故障录波器动作。由此可见, 对此现象作一个深入的分析研究是十分有必要的。

本文首先对实际的现场录波数据作了详细的分析, 然后在等效电路的基础上进行了相应的理论推导, 得出了一些有益的结论, 最后, 通过仿真实验验证了这一现象并初步分析了相关的影响因素, 希望能为有关人员提供一些有益的参考。

1 现场录波及等效电路分析

图 1 所示为某电厂#4 主变冲击时, 临近电厂#2 机主变有功、和无功的现场录波波形。

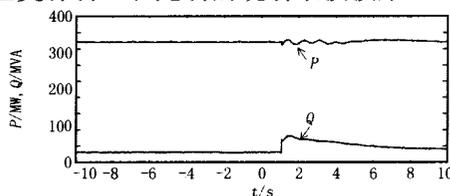


图 1 现场录波

Fig.1 Site recording wave

由图 1 可以看出, 在主变冲击时, 发电机的无功将突然增大, 然后随着变压器涌流的衰减而逐渐减小到原值附近, 达到稳定; 而发电机的有功 P 则是在原值附近发生波动, 随着涌流的衰减而逐步恢复稳定。另外, 从数值上来看, 无功变化幅度较大, 最大可达 50 MVA, 有功变化较小, 在 10 MW 以内。

为了进一步验证上述现场录波分析得出的结论, 下面本文从简化模型入手, 在等效电路的基础上分析一下变压器空充时系统的响应过程, 如图 2 (a) 所示, 其中: 发电机 G 采用简化等效模型, 变压器 T_1 、 T_2 为两折线饱和模型^[4]。该系统单相等效电路如图

2 (b), 其中: U_G 为发电机等效电源; L_G 、 r_G 为系统等效电感、电阻; $r_{1\sigma}$ 、 $L_{1\sigma}$ 、 L_{1m} 、 $r_{2\sigma}$ 、 $L_{2\sigma}$ 、 L_{2m} 、分别为 T1、T2 (Γ 等效) 的线圈电阻、电感及励磁电感; r_1 、 L_1 为负荷电阻、电感。为了便于分析, 忽略变压器线圈电阻和电感及系统等效电阻 r_G 。

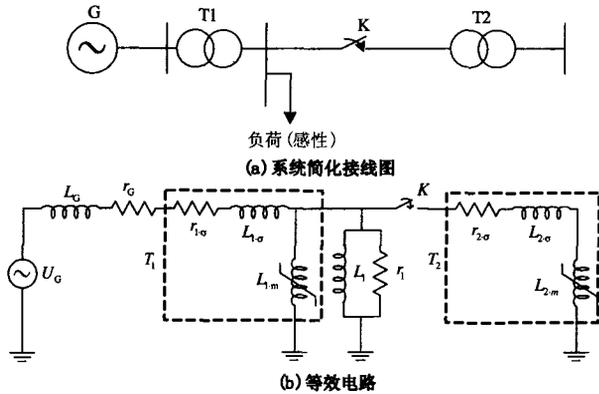


图 2 系统接线及等效电路

Fig.2 System configuration and equivalent circuit

当开关 K 未合闸时, 系统阻抗为:

$$Z = jX_G + jX_1 // r_1 = jX_G + \frac{X_1 \cdot r_1}{X_1 - jr_1} = \frac{X_1^2 \cdot r_1}{r_1^2 + X_1^2} + j[X_G + \frac{X_1 \cdot r_1^2}{r_1^2 + X_1^2}] = R + jX \quad (1)$$

开关 K 合闸时由于励磁线圈磁链不能突变, 并有可能存在剩磁, 变压器 T2 通常会发生饱和, 造成励磁电感 L_{2m} 急剧下降, 从而产生很大的励磁涌流^[1], 此时回路的阻抗为:

$$Z' = jX_G + jX_1 // r_1 // jX_{2m} = jX_G + \frac{X_{2m} \cdot X_1 \cdot r_1}{X_{2m} X_1 - jr_1 \cdot (X_{2m} + X_1)} = jX_G + \frac{X_1 \cdot r_1}{X_1 - jr_1 \cdot (1 + X_1 / X_{2m})} = R' + jX' \quad (2)$$

其中: $R' = \frac{X_1^2 \cdot r_1}{X_1^2 + r_1^2 \cdot (1 + \frac{X_1}{X_{2m}})^2}$

$$X' = X_G + \frac{X_1 \cdot (1 + \frac{X_1}{X_{2m}}) \cdot r_1^2}{X_1^2 + r_1^2 \cdot (1 + \frac{X_1}{X_{2m}})^2}$$

由式 (1)、(2) 比较可知, Z 实际为 Z' 在 T2 不饱和时 (L_{2m} 趋于无穷大) 时的特例, 因此本文统一

以式 (2) 进行分析, 发电机 G 的有功 P 、无功 Q 为:

$$P = \text{Re}(\frac{U_G^2}{Z'}) = U_G^2 \cdot \frac{R'}{|Z'|^2} \quad (3)$$

$$Q = \text{Im}(\frac{U_G^2}{Z'}) = U_G^2 \cdot \frac{X'}{|Z'|^2} \quad (4)$$

将式(1)、(2)带入, 不难证明:

$$\frac{dP}{dX_{2m}} > 0, \frac{dQ}{dX_{2m}} < 0 \quad (5)$$

因此, 有功 P 为关于 X_{2m} 的增函数, 无功 Q 为关于 X_{2m} 的减函数。易知, 当变压器饱和, 励磁阻抗 X_{2m} 大大下降时, 系统所需的有功 P 减小, 无功 Q 增加; 另外, 由于系统阻抗一般相对较小, 由式 (1) ~ (3) 知

$$P \approx \frac{U_G^2}{r_1} \quad (6)$$

其值在 X_{2m} 变化期间变动并不大。

由于整个暂态过程中存在变压器这个非线性元件, P 、 Q 曲线很难用解析的方式得到, 因此, 本文利用 Matlab 中的 Simpower 工具箱^[5]对图 2 系统进行建模, 通过仿真得到此时发电机有功、无功的变化图, 如图 3 所示, 在合闸初期变压器饱和比较严重, 系统有功、无功变化量最大, 随着涌流的衰减、变压器饱和程度逐渐降低, 有功、无功逐渐恢复到原来状态。可以看到, P 、 Q 的变化趋势与实际录波是比较一致的。

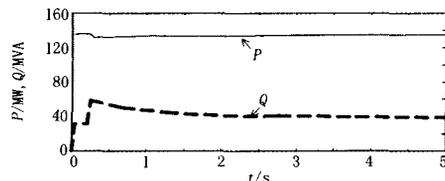


图 3 P-Q 变化图

Fig.3 P-Q variation curve

2 仿真建模分析

在图 2 所示系统中, 除了变压器采用了复杂的饱和模型外, 发电机等其他元件均采用简化模型, 故 P 、 Q 波形没有明显的暂态波动过程。而实际的发电机模型则要复杂得多, 其暂态过程也要复杂得多。所以下面将采用一个更接近于实际的仿真系统进行分析, 如图 4 所示。该系统中的发电机 G 采用包括励磁器、调速器的标准模型; L1、L2、L3 为输电线路, 采用分布参数模型; S 为等效电源。

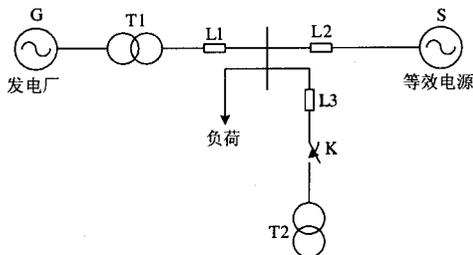


图 4 发电机采用标准模型的仿真系统

Fig.4 Standard generator model adopted simulation system

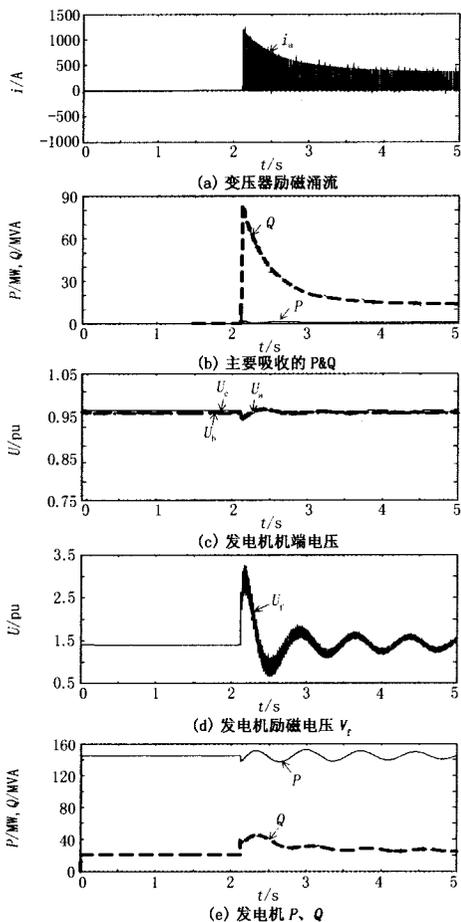


图 5 主变空充引起发电机功率波动仿真波形

Fig.5 Simulation wave of the generator power swing in transformer magnetizing

下面结合图 5 来说明一下主变空充时整个系统的暂态过程：图 5 (a)~5 (e) 分别为开关 K 合闸进行主变空充时的主变励磁涌流 (a 相)、主变吸收 P&Q、发电机机端电压、发电机励磁电压和发电机 P、Q 波形。可以看到，开关 K 合闸后，变压器发生饱和，励磁阻抗瞬时大大减小，产生很大的励磁涌流，系统所需的无功增加，同时造成临近发电机机端电压瞬时下降，从而引起发电机励磁调节器动作，励磁电压迅速增加，发电机无功出力也随之快

速增加；随后变压器饱和程度开始慢慢下降，励磁涌流慢慢衰减，系统所需的无功也随之减少，母线及机端电压慢慢恢复，发电机无功出力减小，并最终趋于稳定。同时也看到，发电机的有功出力基本上是在原值附近上下波动。

与图 2 系统相比较，利用考虑了发电机复杂模型的仿真系统 (图 4) 得到的发电机 P、Q 波形与实际系统录波得到的波形基本上是一致的，同时也说明：有功、无功的波动主要是由于发电机及其控制系统 (励磁器、调速器等) 的暂态响应引起的。

3 主要影响因素

通过上面的分析可知，发电机功率的波动主要是由于变压器励磁涌流导致系统无功需求暂时增加及母线电压暂时下降引起的，P、Q 波动的幅度主要与系统 S 的强弱、空充变压器 T2 的参数 (容量、励磁曲线等)、发电机 G 与空充变压器联系的紧密程度、发电机 G 自身及其调节器暂态特性等多种因素有关，从解析的角度来分析各种因素的影响，是非常困难的，因此，下面通过仿真手段对其中的几个主要的影响因素做简要分析。

3.1 系统 S 的强弱

系统 S 的强弱对发电机功率波动的影响如图 6 所示。从图中可以看出，当系统 S 较强时，暂态过程中的 P、Q 需求主要由 S 供给，此时发电机的功率波动比较小；反之，S 较弱，G 的功率波动则比较大。

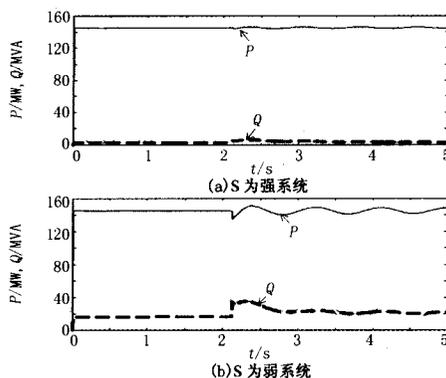


图 6 考虑系统 S 强弱影响时的仿真结果

Fig.6 Simulation results influenced by the system's capacity

3.2 变压器的容量及饱和程度

取不同容量的变压器进行仿真得到的 P、Q 波形图如图 7 所示。可见，变压器的容量越大，饱和程度越深，其励磁涌流就越大，暂态无功需求就越大，母线电压下降的越厉害，发电机受的影响也就越大。

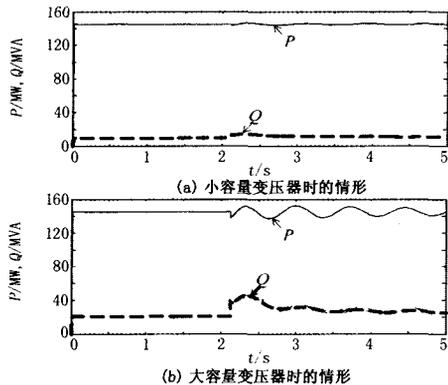


图7 考虑变压器容量影响时的仿真结果

Fig.7 Simulation results influenced by the transformer's capacity

3.3 发电机与变压器联系的紧密程度

图8给出了连接发电机与变压器之间线路长短对发电机 P 、 Q 波动的影响。由图可见,发电机与待空充主变联系越紧密,其受空充暂态过程的影响也就越大,其功率波动就越剧烈。

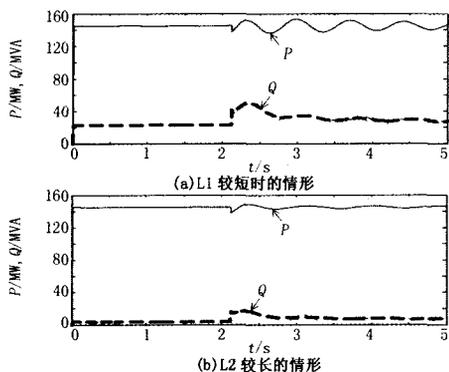


图8 考虑线路长短时的仿真结果

Fig.8 Simulation results influenced by the transmission line's length

3.4 发电机G调节器的暂态特性

图9给出了在不同发电机暂态特性下的 P 、 Q 波形图。可以看到,发电机的无功波动主要受励磁调节器的影响,而有功波动与调速器关系不大,主要是由发电机本身的暂态特性引起。

4 相关措施

综合上述仿真结果可知,整个暂态过程主要是由于主变冲击过程中发生饱和引起的,一般不会对系统造成影响,但如果主变容量很大并有较高剩磁时,可能使得与其连接紧密的发电机 P 、 Q 波动很大,对发电机的冲击较大,并可能导致相关监控设

备如故障录波器等不必要的动作,因此,可以考虑下面措施以降低主变冲击过程对邻近发电机 P 、 Q 的影响:

(1) 采取相关措施降低空投时励磁涌流的幅度^[6-9],目前已经应用的方法主要是PSD(Point on Wave Switching Device)法^[10]。

(2) 变压器空充时,尽量增大邻近发电机与主变的电气距离,以减小其影响,如:对于同电厂的发电机而言,可以将主变与发电机分配在不同的母线分段上。

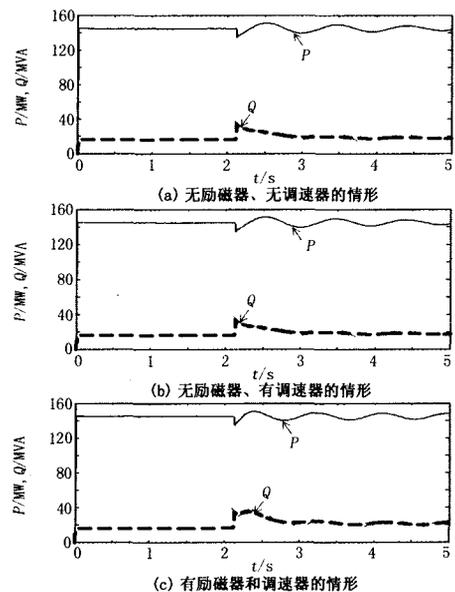


图9 考虑发电机调节器有无时的仿真结果

Fig.9 Simulation results whether there is a generator excitation regulator

5 结论

本文通过理论推导及相关的录波数据与仿真分析,解释了主变冲击过程造成邻近发电机 P 、 Q 波动这一物理现象,并对这一过程中的主要相关因素做了初步的仿真分析。主要结论包括:

(1) 在此暂态过程中,发电机的无功 Q 将突然增大,然后逐渐衰减至稳态,有功 P 则基本上是在原值附近上下波动,最后,随着暂态过程的消失而趋于稳定。

(2) P 、 Q 波动的幅度主要与系统 S 的强弱、空充变压器 $T2$ 的参数(容量、励磁曲线等)、发电机 G 与空充变压器联系的紧密程度、发电机 G 自身及其调节器暂态特性等多种因素有关。

(3) 要降低主变冲击对邻近发电机的影响,则需要采取相应的措施,如降低励磁涌流的幅度,增

大发电机与主变的电气距离等。

参考文献

- [1] Rico J, Madrigal M. The Study of Inrush Current Phenomenon Using Operational Matrices[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 231-237.
- [2] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 变压器有载合闸超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 6-11.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al. Ultra-Saturation State During Transformer Switch-in with Load and Its Influence to Transformer Differential Protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 6-11.
- [3] 王雪, 王增平, 徐岩, 等. 电力变压器励磁涌流和故障电流的仿真研究[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 11-16.
WANG Xue, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. Research on Simulation of Magnetic Inrush and Fault Current for Power Transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6): 11-16.
- [4] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian. Relay Protection Principle and Application of Main Electrical Equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [5] Online help for MATLAB[Z]. The mathworks. Inc. 2004.
- [6] Brunke J H, Frohlich K J. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching, Part I: Theoretical Considerations[J]. IEEE Trans Power

Delivery, 2001, 16 (2) : 276-280.

- [7] Brunke J H, Frohlich K J. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching, Part II: Application and Performance Considerations [J] IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16 (2) : 281-285.
- [8] CIGRE Working Group Task Force 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers[Z]. 1st Part Elektra, 1999. 43-73.
- [9] CIGRE Working Group Task Force 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers[Z]. 2nd Part Elektra, 1999. 37-57.
- [10] 甘运良, 袁鹏. SWITCHSYNC F236 的工作原理及其在肇庆换流站的应用[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1(3): 47-50.
GAN Yun-liang, YUAN Peng. The Principle and It's Application in Zhaoqing Conversion Station of SWITCHSYNC F236[J]. South Power System Technology Research, 2005, 1(3): 47-50.

收稿日期: 2007-07-09

作者简介:

张雪松 (1979-), 男, 博士, 工程师, 从事电力系统自动化方面的研究; E-mail: ee_zxs@163.com

黄莉 (1978-), 女, 硕士, 讲师, 从事水电站计算机监控系统与综合自动化方面的研究;

黄晓明 (1969-), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护及自动化管理及研究工作。

(上接第 12 页 continued from page 12)

参考文献

- [1] 李先跃. 电力系统直流接地危害性分析及预防措施 [J]. 建筑安全, 2004, 5(5): 70-71.
LI Xian-yue. Analysis and Precautionary Measures of Electrical System DC Grounding harmfulness[J]. 2004, 5(5): 70-71.
- [2] 李冬辉, 张伟. 小波分析应用于直流系统接地故障检测 [J]. 控制工程, 2006, 13(4): 399-400.
LI Dong-hui, ZHANG Wei. Grounding Fault Detection of DC System Based on Wavelet Analysis[J]. Control Engineering, 2006, 13(4): 399-400.
- [3] 张次衡. 直流系统接地故障检测装置存在的问题[J]. 中国电力, 1996, 29(7): 64-66.
ZHANG Ci-heng. Problem Existing on DC System Grounding Fault Monitoring Device[J]. Electric Power, 1996, 29(7): 64-66.
- [4] 李冬辉, 任晓栋. 基于幅值小波变换的直流系统接地故

障检测[J]. 中国电力, 2003, 36(11): 12-14.

- LI Dong-hui, REN Xiao-dong. Detection of DC System Grounding Fault Based on Complex Wavelet Transform[J]. Electric Power, 2003, 36(11): 12-14.
- [5] Labrosse J J. μ C/OS-II-原码公开的实时嵌入式操作系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
Labrosse J J. MicroC/OS-II The Real-time Kernel[M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2003.

收稿日期: 2007-07-20;

修回日期: 2007-09-07

作者简介:

任先文 (1954-), 男, 教授, 硕士, 研究方向为微机在电力系统中的应用;

邹刚 (1982-), 男, 研究生, 研究方向为微机在电力系统中的应用; E-mail: gang1012718@163.com

史永广 (1981-), 男, 研究生, 研究方向为微机在电力系统中的应用。