

燃油电厂黑启动初期励磁涌流的数字仿真和试验研究

余涛^{1,2}, 韦曼芳¹, 陈家荣²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 香港理工大学电机工程系, 香港)

摘要: 具有自启动能力的燃油电厂在广东地方电网黑启动中承担重要角色, 但这些电厂常常在空充主变时受励磁涌流冲击而导致黑启动失败。电厂负荷和发电机控制系统的复杂性限制了精确解析方法在励磁涌流研究中的应用。该文利用电磁暂态仿真软件搭建了详细的燃油电厂模型, 研究了黑启动初期励磁涌流对发电机稳定运行的影响及减少励磁涌流冲击的措施, 其研究结论在现场试验中得以成功应用。

关键词: 变压器; 数字仿真; 黑启动; 燃油电厂

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)10-0032-05

0 引言

为了满足珠江三角洲世界制造业中心对电力的巨大需求, 缺煤少水的广东电网在近二十年来兴建了百余座燃油电厂。由于地方燃油电厂具有启动速度快、功率调节能力强的特点, 因此这些地方电厂在保障广东受端电网的安全和稳定运行方面起到了不可或缺的重要作用。广东电网除了抽水蓄能电厂外, 仅在韶关和肇庆地区分布有少量水电, 其它如深圳、东莞、佛山等重要负荷中心均以燃油或燃气电厂作为地方主力电厂。在电网发生大规模停电时, 以上各地方电网唯一可依赖的黑启动电源均是燃油电厂^[1,2]。

据调查^[1,2], 许多地方燃油电厂在黑启动初期中最困扰的问题是发电机启动后从低压侧空充主变压器, 对于许多扩大单元接线的电厂情况则更加严重。出现以上问题的根本原因是: 地方燃油发电容量均比较小, 对于小机充大主变这种情况, 发电机及其脆弱的厂用电系统很难承受励磁涌流的冲击而造成紧急停机。近年来, 对于变压器励磁涌流的研究主要集中在励磁涌流与故障电流的识别上^[3,4], 在避免保护误动方面作出重要贡献。文献[5,6]对电网黑启动过程中的关键技术问题进行归纳和总结, 但以上文献均较少关注励磁涌流对处于孤岛运行的发电机及其厂用系统稳定运行的影响。

励磁涌流的产生机理可以用利用理想电压源和变压器来进行解释^[4]。但处于黑启动初期的燃油发电机控制系统及其厂用系统的动态特性的复杂性

制约了精确的数学方法在该问题的应用。分析励磁涌流的影响目前最有效方法仍是数字仿真和现场试验^[7~9]。

本文利用电磁暂态仿真软件搭建了详细的燃油电厂仿真模型, 考虑了发电机励磁控制和调速系统、电动机负荷及静态负荷, 研究了励磁涌流对孤岛系统稳定运行的影响及减少励磁涌流冲击的措施, 并在现场试验中成功应用。

1 励磁涌流分析模型

1.1 理想电路模型

用于分析变压器励磁涌流的产生机理可以用图1所示的简单电路模型^[4]。

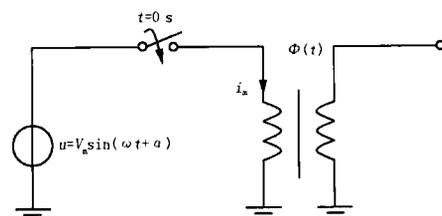


图1 理想空充变压器分析模型

Fig 1 Ideal model for analysis of transformer

考虑空载合闸这种最严重情况, 假设合闸方电源为无穷大电源, 其电压可表示为:

$$u = V_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

当二次侧开路的空载变压器突然合到电压为 u 的无穷大系统上, 忽略变压器漏抗压降, 并令变压器一次绕组匝数 $N = 1$, 则有

$$d\Phi/dt = V_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

对上式两边取积分, 可得空载合闸的铁芯磁通为

$$\Phi = -\frac{V_m}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_r \quad (3)$$

式中: Φ_m 和 Φ_r 分别为最大磁通和铁芯剩磁, 通常

基金项目: 香港特别行政区政府资助科研项目 (Poly U 5200/03E); 国家自然科学基金重点项目 (No. 50337010); 华南理工大学自然科学基金项目资助 (No. 323 - E5040220)

称 $\psi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态磁通, 而将 $\psi_m \cos \alpha + \psi_r$ 合称为暂态磁通。

若令饱和磁通为 ψ_s , 则仅当 $\psi > \psi_s$ 时产生励磁涌流, 假设此时变压器绕组电感为 L , 则励磁涌流为:

$$i_m = (\psi - \psi_s) / L = \frac{V_m}{L} [\cos \omega t - \cos(\omega t + \alpha)] + (\psi_r - \psi_s) / L \quad (4)$$

式中: $x = L$ 为合闸回路的基波电抗。

由式 (4) 可以得到以下结论:

1) 励磁涌流的大小由稳态磁通和暂态磁通决定, 稳态磁通幅值由电源幅值 V_m 决定, 暂态磁通则与变压器合闸时的初始状态有关。

2) 暂态磁通中变压器合闸时的剩磁 ψ_r , 越大则励磁涌流越大。

3) 合闸初始角 $\alpha = 0$ 时有最大的暂态磁通, 也是产生最大涌流峰值的条件。

对于三相变压器, 可将三相变压器分解为三个单相变压器组成, 然后每相励磁涌流可按单相变压器涌流的分析方法来进行。

1.2 实用电路模型

对于黑启动过程中, 如图 1 所示往往是利用自启动的发电机从主变的低压侧向已失电的高压侧母线充电。此时, 充电电源不再是无穷大电源而是相对很弱的一个孤岛系统 (此时发电机处在低功率运行状态)。发电机端的电压幅值不再恒定, 而是与励磁系统电压调节能力有关, 且厂用电动机负荷的影响也不能再忽略。此时, 欲用式 (4) 来计算励磁涌流已不太适用, 实际的动态特性比理论计算复杂得多。对于这样的问题, 我们一般采用详细的发电机、变压器、电动机及负荷模型来进行仿真研究, 如图 2 所示。

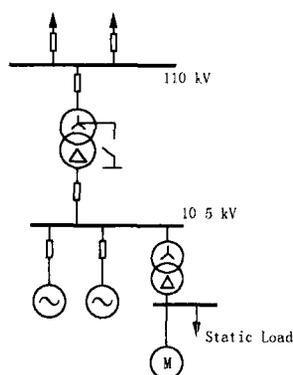


图 2 实用空充变压器分析模型

Fig 2 Enhanced model for analysis of transformer

1) 燃油发电机及其控制系统模型

燃油发电机的电气部分采用标准 6 阶 Park 方程, 机械部分采用 2 阶转子运动方程, 其数学模型详见文献 [10]。

励磁系统采用 IEEE 推荐的标准 1 型^[11], 其电压控制器 (AVR) 采用比例型调节器, 其传递函数为:

$$E_f = \frac{K_a}{1 + T_a s} V_t \quad (5)$$

式中: E_f 为励磁电压偏差; V_t 为机端电压偏差; K_a 和 T_a 为 AVR 的增益和时间常数。

燃油机组的原动机系统采用考虑汽容效应的标准 2 阶汽轮机模型^[10], 调速器采用 P 控制器, 其传递函数为:

$$\mu_g = \frac{1}{1 + T_g s} \cdot (K_{g1} + \frac{K_{g2}}{s}) \quad (6)$$

式中: μ_g 为汽门开度偏差; V_t 为机端电压; K_{g1} 、 K_{g2} 和 T_g 为 PI 调速器的增益和时间常数。

2) 电动机负荷模型

由于电动机负荷对厂用电系统电压稳定性具有决定性作用, 因此在本文中电动机模型采用考虑机电暂态过程的详细数学模型, 电气部分采用标准 4 阶模型, 机械部分采用 2 阶转子运动方程^[10]。

3) 静态负荷模型

除了电动机负荷外, 其它负荷可用恒阻抗模型来代替^[10]。

2 仿真研究

利用国际通用的电磁暂态仿真软件, 本文对以下与黑启动有关的问题进行了研究, 下文将分别进行讨论。

以广东佛山某燃油电厂为例, 该厂含 6 台 10.2 MW 发电机; 2 台 90 MVA 主变, 主变额定电压为 121/10.5 kV, 额定电流为 429.4/4949 A。为了便于仿真比较, 且考虑剩磁影响比较严重的一种情况, 可定义变压器三相的剩磁为 $\psi_a = 0.8 \text{ p.u.}$ 、 $\psi_b = -0.8 \text{ p.u.}$ 和 $\psi_c = 0.8 \text{ p.u.}$ ^[4]; 等值电动机额定功率 375 kW。

2.1 多机系统与励磁涌流冲击的关系

为了保证仿真结果具有可比性, 我们通过比较单机、双机和三机系统, 使其处于相同的负荷水平, 然后通过改变开关时间的方法随机地多次进行仿真计算。单台发电机空充主变时三相电流 I_{abc} 、机端电压有效值 V_t 和同步发电机转速 ω_m 的典型时域波形如图 3 所示, 两台发电机并列运行后空充主变时的

典型时域波形如图 4 所示。

经过统计比较发现:增加发电机台数并不能显著改变励磁涌流的大小,但却能有效地增强孤岛系统承受励磁涌流冲击的能力。如图 3 和图 4 所示,在相同的负荷水平和相同的合闸角的条件下,机端电压最小值由单机的 0.6 增加到双机的 0.7 左右,转速最小值也由 0.994 升至 0.997 左右,整个孤岛系统机组运行的稳定性明显提高。

事实上,可以通过分析孤岛系统的物理结构来对以上现象进行解释:励磁涌流的大小主要与主变容量、剩磁、送端电压以及合闸角有关,孤岛系统中的发电机台数仅仅会影响以上因素中的送端系统的电压幅值,发电机台数的增加会令整个孤岛系统转子系统的转动惯量增大,这使得孤岛系统耐受电磁功率暂态变化的能力变强;另一方面,发电机台数的增加令孤岛系统的等效内电抗变小,这使得孤岛系统对送端系统电压的稳定能力变强,这也减少了机端电压变化对孤岛系统内的发电机和电动机稳定运行的影响。

2.2 负荷对励磁涌流冲击的影响

1) 异步电动机负荷

通过改变电动机的输出转矩,可以改变电动机的输出功率,从而改变当前的动静态负荷的构成。表 1 给出了不同的电动机转矩下,励磁涌流及其它状态量的变化情况。

表 1 异步电动机负荷变化对比计算表

转矩 /N·m	最大励磁 涌流 /p.u.	机端电压 /p.u.	孤岛电网 频率 /p.u.	异步电动 机转速 /n
8 000	1.79	0.62~1.22	0.997 8~1.000 9	1 390~157 0
7 500	1.77	0.70~1.21	0.997 8~1.000 8	1 410~1 560
7 000	1.78	0.73~1.20	0.998 0~1.000 8	1 450~1 550

2) 静态负荷

保持异步电动机负荷不变,改变恒阻抗负荷模型中电感及电阻值可获得不同静态负荷工况,表 2 给出不同的静态负荷水平下,励磁涌流和其它状态量的变化情况。

表 2 静态负荷变化对比计算表

转矩 /N·m	最大励磁 涌流 /p.u.	机端电压 /p.u.	孤岛电网 频率 /p.u.	异步电动 机转速 /n
1+j0.4	1.65	0.59~1.25	0.996 3~1.000 5	1 350~1 590
2+j0.6	1.79	0.62~1.22	0.997 8~1.000 9	1 390~1 570
4+j1.2	1.77	0.66~1.22	0.997 5~1.001 4	1 350~1 590

通过分析不同的电动机和静态负荷的计算结果发现:

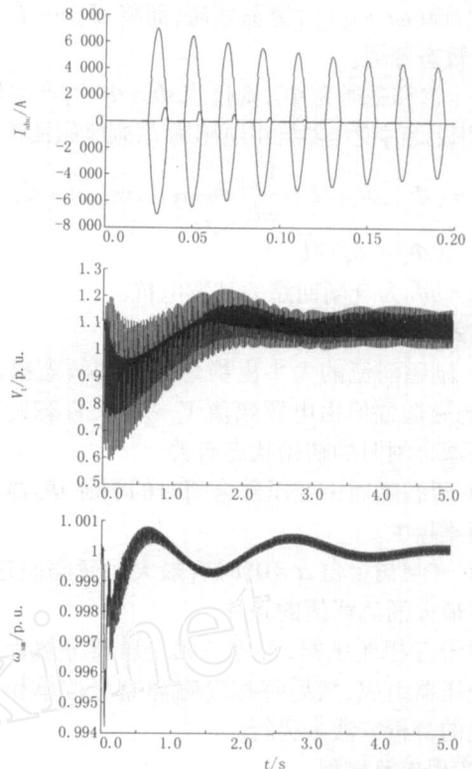


图 3 单机系统主要状态变量

Fig 3 Main state variables of the single generator

1) 异步电动机负荷的大小并不能显著影响励磁涌流的大小,但异步电动机负荷越小,则孤岛系统的电压和频率越平稳。这是因为异步电动机对母线电压的变化比较敏感,如果孤岛系统中存在容量较大的异步电动机,则励磁涌流带来的母线电压波动会导致异步电动机输出功率发生振荡,这又会反过来加剧发电机出力的振荡,严重的还会导致异步电动机因瞬态电压过低而停机,最终导致整个厂用电系统紧急停运。

2) 静态负荷的大小并不能显著影响励磁涌流的大小,但适当增加主变充电前孤岛系统的负荷水平却可增加孤岛系统机组对励磁涌流耐冲击能力。这是因为静态负荷的大小会改变孤岛系统的等值内电抗,静态负荷的增加会令内电抗变小,这使得孤岛系统对送端系统电压的稳定能力变强,从而增强了孤岛系统的耐冲击能力。

2.3 励磁控制系统对励磁涌流的影响

由式(4)可知,机端电压将直接影响到励磁涌流的大小,而励磁系统 AVR 的作用在其中起到决定作用。下文将通过改变 AVR 的控制参数来研究励磁控制系统对励磁涌流的影响。表 3 给出 AVR 典型参数下的励磁涌流及其它状态量的计算结果。

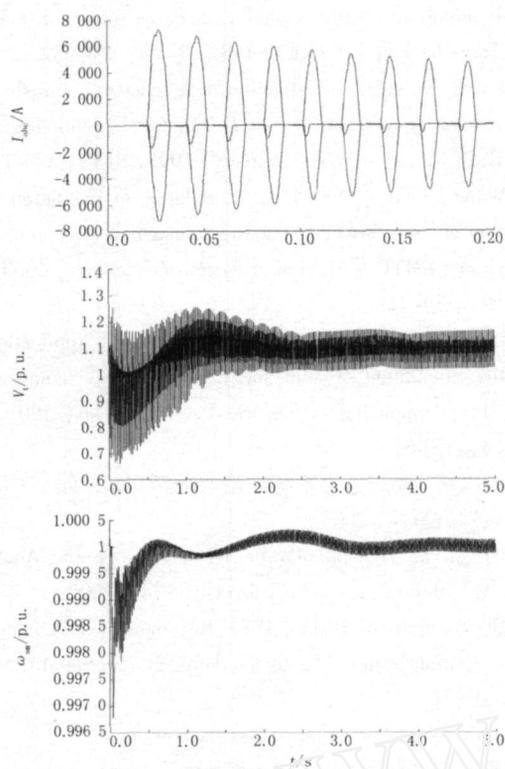


图4 双机系统主要状态变量

Fig 4 Main state variables of the double generator

经过分析仿真结果发现:通过增加 AVR 的增益 K_a , 缩短 AVR 的响应时间 T_a , 可以更好地保持机端电压, 且对整个孤岛系统的稳定运行有积极作用; 但另一方面也由于提高了对母线电压的动态调节能力从而增加了励磁涌流, 这一点可以通过式 (4) 获得简单解释。

表3 励磁系统 AVR 参数变化对比计算表

Tab 3 Influences of different AVR control parameters

K_a/T_a (S)	最大励磁 涌流 /p.u.	机端电压 /p.u.	孤岛电网 频率 /p.u.	异步电动 机转速 /n
46/0.06	1.69	0.60~1.21	0.996~1.002	1.410~1.535
200/0.02	1.76	0.62~1.22	0.9972~1.0019	1.410~1.540
300/0.01	1.761	0.62~1.201	0.9973~1.0019	1.410~1.540

3 现场试验

本文作者在广东佛山供电分公司及相关电厂的大力支持下, 在本文仿真算例所涉及的燃油电厂进行了黑启动试验。

由于该电厂曾经出现过单机空充主变失败的经验, 因此根据试验前的仿真计算的结果, 我们建议采用启动两台发电机, 然后在保证最大程度利用厂用静态负荷的条件下进行空充主变操作。在采用本文提出的试验方案后, 双机成功地进行了空充主变操

作。图 5 和图 6 分别为利用电科院便携式录波仪采集到的空充主变时的励磁涌流及机端电压的时域波形 (已根据 PT/CT 变比将二次值转换为一次值)。

在试验中, 主变低压侧测量到的产生励磁涌流的最大峰值为 2 016 A (主变低压侧额定电流 4 949 A), 表明此次合闸的励磁涌流不是很大; 一个周期后就衰减到 1 298 A, 衰减的速度比较快, 最后经过大约 10 个周期, 电流就衰减到 170 A; 机端暂

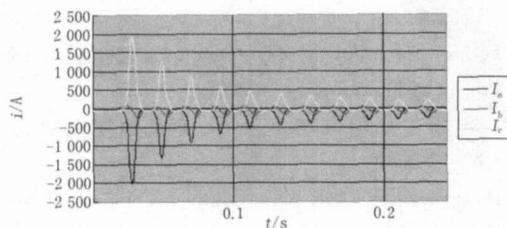


图5 励磁涌流的试验采集数据

Fig 5 Inrush current in experiment

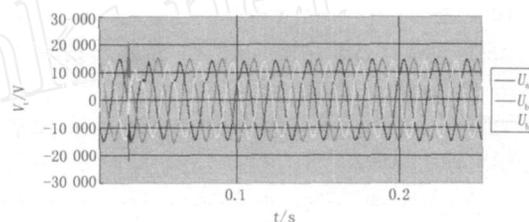


图6 机端电压的试验采集数据

Fig 6 Generator/bus voltage in experiment

态电压最大值为 15.32 kV, 是额定电压的 1.46 倍; 在合闸后第一个周期电压最低下降到 7.35 kV, 下降明显, 不过下一个周期峰值就上升到 8.63 kV, 电压波形畸变和降低的时间很短。以上说明电厂励磁系统的控制效果比较好。

试验数据与数字仿真存在一定差异, 主要可归因于试验用的变压器的实际剩磁比数字仿真所定义的要小, 而实际剩磁缺乏有效的测量手段。

4 结语

承受变压器励磁涌流的冲击是广东地方电网燃油电厂黑启动是否成功的第一个难关。燃油电厂自身的复杂性限制了精确数学方法在该问题的应用。本文利用数字仿真手段研究了励磁涌流对孤立小电网的冲击, 对现场调度运行人员关心的空充主变前系统应处于的开机数量、负荷水平及控制系统参数问题进行了分析, 为后续的现场黑启动试验的成功实施提供了科学依据, 其结论对其它地区电网黑启动也具有较高参考价值。

致谢:

本论文的工作得到了广东电网公司佛山供电分局调度中心张飞华经理、调度班长吴海江、运方科胡玉峰博士等领导和技术专家的大力支持,在此特别致谢!

参考文献:

- [1] 广电集团佛山供电分公司. 佛山电网黑启动方案 [T]. 2005.
Foshan Electricity Supply Branch Company. Black-start Project of Foshan Power Grid [T]. 2005.
- [2] 广电集团东莞供电分公司. 东莞电网黑启动方案 [T]. 2004.
Dongguan Electricity Supply Branch Company. Black-start Project of Dongguan Power Grid [T]. 2004.
- [3] 任震, 黄雯莹. 电力系统小波分析及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
REN Zhen, HUANG Wen-ying Wavelet Analysis and Application to Power Systems [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [4] 王维俭. 大型发电机组继电保护原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
WANG Wei-jian Theoretical Base of Large-scale Generator Units Relay Protection [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [5] Adibi M M, Clelland P, Fink L, et al Power System Restoration——a Task Force Report [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(3): 144-152.
- [6] Adibi M M, Clelland P, Fink L, et al Power System Restoration——the Second Task Force Report [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(4): 927-932.
- [7] Lin C E, et al Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformers, Part I Numerical Simulation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(1): 144-152.
- [8] Wang J, Yu T, Shu H C. Simulation of Excitation Current of Transformer Using Electromagnetic Transient Program (EMTP) [J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 39-41.
- [9] Ling G, Zhang N C, Wu J T. Design and Application of the Simulation System for Electric Power Transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 59-61.
- [10] 倪以信. 动态电力系统理论与分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin Dynamic Power System Theory and Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [11] IEEE Standards Board, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies [S].

收稿日期: 2005-09-15; 修回日期: 2005-11-15

作者简介:

余涛 (1974 -), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论和仿真研究; E-mail: taoyul@scut.edu.cn

韦曼芳 (1981 -), 女, 硕士研究生, 从事电力系统建模和仿真研究工作。

Simulation and experimental study on transformer excitation inrush current in black-start of oil-fired thermal plants

YU Tao^{1,2}, WEI Man-fang¹, CHANG Ka-wing²

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: The oil-fired thermal plants, which are regarded as the important black-start sources in the Guangdong power grid, often fail in charging the idle-load transformers owing to the severe impacts of the excitation inrush currents. Because of the complexity of the load and the control systems, the quantitative analysis method is not suitable for the problem solving. In the paper, the explanation of the relevant mechanism is also provided, and the detailed model-based electromagnetic transient simulation is implemented to study the complex dynamic behaviors of oil-fired thermal plant in the preliminary term of black-start. Besides the magnitude of inrush current, the simulation results show that the multimachines and proper load connected with the generation will help reduce the impacts of transformer excitation inrush current on plants, which is verified by the field experiment.

This project is supported by Scientific Research Project of the Government of the Hong Kong Special Administrative Region of the P. R. China (No. Poly U5200/03E), National Natural Science Foundation of China (No. 50337010), and National Natural Science Foundation of South China University of Technology (No. 323-E504220).

Key words: transformer; digital simulation; black-start; oil-fired thermal plant