

基于软开关技术的大型发电机灭磁系统改进

朱建行, 谭亲跃, 邹蕴韬, 赵华, 张君成, 朱宝慧, 周雷

(西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 传统灭磁过程中强拉灭磁开关引起的过电压及大电弧带来的危害, 使得大型发电机的灭磁问题成为一个重要的研究课题。电力电子软开关技术为大型发电机灭磁提供了新的途径。以三峡电厂励磁参数为基础, 设计出一种基于软开关技术的灭磁系统及其相应的控制电路, 提出一种新的非线性电阻灭磁建压方式, 即“并联充电, 串联放电”, 使得灭磁过程中的冲击电压显著减小, 当灭磁主回路电流降为零时拉开灭磁主开关。由理论分析和仿真可知从灭磁系统启动到非线性电阻启动时间为 0.07 s, 灭磁时间为 0.4 s, 说明了该系统快速、安全、可靠的灭磁功效。

关键词: 大型发电机; 灭磁; 软开关; “并联充电, 串联放电”; 非线性电阻

Improvement of de-excitation system for large generators based on soft-switching technology

ZHU Jian-hang, TAN Qin-yue, ZOU Yun-tao, ZHAO Hua, ZHANG Jun-cheng, ZHU Bao-hui, ZHOU Lei

(Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The damage of overvoltage and big arc caused by strongly pulling out the magnetic switch in the traditional process of de-excitation makes the de-excitation problem of the large generator become an important research subject. The technology of power electronics soft-switching provides a new way for the de-excitation of the large generator. In this paper, a de-excitation system and its corresponding control circuit is designed based on the excitation parameters of the Three Gorges Power Plant. And it proposes a new way to build pressure nonlinear resistor in de-excitation, namely "parallel charged, series discharged", which significantly reduces the impact of voltage in de-excitation process, the de-excitation main switch is pulled off when the main circuit current reduces to zero. The theoretical and simulation analysis prove that the time from the start of de-excitation system to the start time of the nonlinear resistor is 0.07s. The de-excitation time is 0.4s, indicating that the de-excitation system is fast, safe and reliable.

Key words: large generators; demagnetization; soft switching; "parallel charged, series discharged"; nonlinear resistor

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0116-05

0 引言

大型发电机机组额定励磁电压高、励磁电流大, 这给同步发电机快速安全灭磁带来了巨大的挑战, 国内外的研究多集中在传统灭磁方式的改进和灭磁设备制造工艺的改良, 而这对大型发电机灭磁是不能满足的, 如何更安全和快速地灭磁仍然是大型发电机灭磁存在的突出问题。到目前为止, 发电机磁场断路器大都串联在励磁直流回路中, 采用直流灭磁开关。随着发电机容量的不断增大, 励磁机的参数也相应地增大, 而直流灭磁技术越来越不适用灭磁技术发展的需要, 进而提出交流灭磁系统, 即将磁场断路器串联在励磁整流电源的交流侧, 采用交流开关^[1-6]。无论是直流灭磁技术还是交流灭磁技

术, 灭磁的成败主要依靠灭磁开关的强度, 包括灭磁开关的建压能力、燃弧强度和遮断容量等^[7], 开关燃弧的电气强度与 UI 成正比, 当开关燃弧能量大于开关额定容量, 就会造成开关损坏, 不能成功安全、快速实现灭磁, 从而造成灭磁失败, 危及发电机的安全^[8-10]。国外普遍采用的匹配 SiC 非线性电阻或线性电阻的移能灭磁方式, 即“软开关灭磁”, 对开关的遮断强度要求有所降低, 有利于开关建压换流, 仅能保证额定励磁以下的常规参数灭磁, 对于可能发生的极限灭磁情况没有保障能力^[7-8, 11]。

对比传统灭磁方案的技术和效果, 本文提出一种新型软开关灭磁方案及其“并联充电, 串联放电”的灭磁建压方式, 使非线性电阻快速启动并对灭磁能量进行消耗, 通过对该系统进行理论和软件仿真

分析, 得出该系统快速、安全、可靠的灭磁性能。

1 新型灭磁方案的提出

针对以上的分析结果及现有技术的发展情况^[12-15], 本文提出了一种基于软开关技术的灭磁系统设计, 如图 1 所示, 并根据该设计特点提出一种新的灭磁建压方式, 即“并联充电, 串联放电”, 使该系统可以适应不同型号大小的发电机励磁系统。

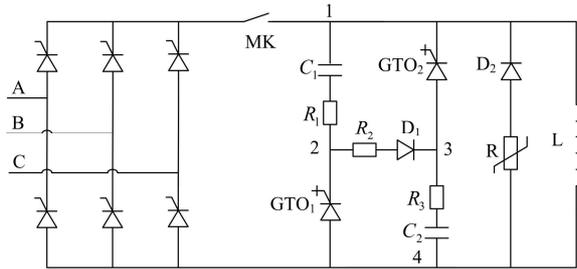


图 1 新型灭磁系统原理图

Fig. 1 Schematic of new de-excitation system

如图 1 所示, 三相交流电经过晶闸管控制的整流电路输出直流电, C_1 、 C_2 为灭磁主充电电容, 同时在励磁系统正常工作中起滤波的作用, R_1 、 R_2 、 R_3 线性电阻在灭磁过程中消耗一部分磁场能量, 全控型器件 GTO_1 、 GTO_2 根据外部继电保护信号和内部电压建压大小判断其开断, 以达到软关断的目的, 灭磁电阻 R 为 Z_nO 非线性电阻, 作为主要的耗能原件, 励磁绕组等效为纯电感原件 L 。

2 新型灭磁方案原理

由图 1 可知, 在励磁系统正常运行过程中, 该灭磁装置并联在励磁绕组上, 对发电机励磁正常运行没有任何影响, 且原理图 1-2-3-4 回路对整流输出电流的高次谐波进行滤波, 有利于发电机安全可靠运行, 在该回路进行滤波的同时, 对主电容 C_1 、 C_2 进行充电, 为灭磁过程中软开关启动时刻做准备。

该灭磁系统的主动灭磁能力使其更加适应不同容量发电机的要求, 当发电机需要停运灭磁时, 发电机检测内外部故障的保护装置或其他灭磁指令发出相应的动作指令, 首先关闭晶闸管整流器整流触发脉冲, 并触发全控型器件 GTO_1 、 GTO_2 导通, 使励磁主回路电流转移到该灭磁系统中, 在此过程中, 由高频谐波充电的电容器开始放电, 迫使励磁主回路电流降低, 在二者的双重作用下, 励磁主回路电流下降为零, 此时拉开励磁主回路开关 MK , 实现励磁主开关的零电流关断, 励磁电源与励磁系统分离, 有利于系统快速灭磁的实现。开关 MK 拉开

之后, 励磁绕组等值电感中的能量开始向并联电容反向充电, 电压监测系统监测 1、2 点的电压 U_{12} 和 3、4 点的电压 U_{34} , 并进行数学加和, 来作为全控型器件 GTO_1 、 GTO_2 开断的逻辑判断信号, 当二者的建压达到非线性灭磁电阻的启动电压时, 励磁绕组停止给并联电容反向充电, 关断全控型器件 GTO_1 、 GTO_2 , 此时电容 C_1 、 C_2 呈串联结构, 构成的电压为二者的电压和, 构成足够高的电压启动非线性电阻, 以改善非线性电阻的导通条件, 并实现了“并联充电, 串联放电”, 最终磁场中的剩余能量被非线性电阻 Z_nO 和三块线性电阻消耗, 达到快速灭磁的目的。

3 新型灭磁方案时序分析

发电机事故停机灭磁时序图如图 2 所示, 励磁装置得到励磁系统退出命令, 即在时间 t_1 处, 此时本灭磁系统开始启动, 同时励磁整流装置停止整流触发, 在时间 t_2 处触发全控型器件 GTO_1 、 GTO_2 , 使其导通, 开始励磁系统主电路电流换流和软开关电容放电过程, 时间 t_1 、 t_2 之间相差 5 ms, 随后励磁主回路开关 MK 在 t_3 时刻打开, 时间 t_2 、 t_3 之间相差 40~60 ms, 励磁绕组中能量开始为并联电容反向充电, 在时间 t_4 时刻关闭全控型器件 GTO_1 、 GTO_2 , 开始非线性电阻和线性电阻耗能阶段, 时刻 t_4 在不同的系统中各不相同, 由系统内部电压监测信号给出。

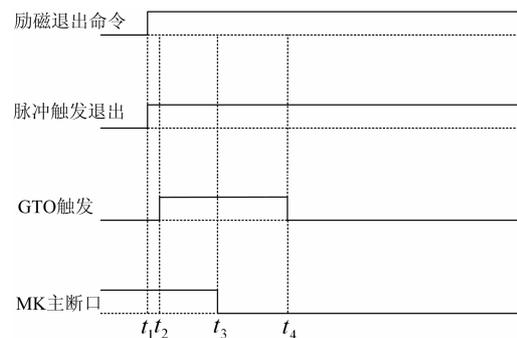


图 2 新型灭磁系统灭磁时序图

Fig. 2 New de-excitation timing diagram of the magnetic system

4 新型灭磁方案理论分析

由图 1 灭磁系统原理图设置电路主原件参数, 灭磁主充电电容 C_1 、 C_2 为 $1\ 000\ \mu F$, R_1 电阻值为 $5\ \Omega$, R_2 电阻值为 $0.01\ \Omega$, R_3 电阻值为 $10\ \Omega$, 励磁绕组 L 为 $0.3\ H$, 灭磁电阻 R 为 Z_nO 非线性电阻, 其启动电压为 $2\ 300\ V$ 。三峡机组容量 $700\ MW$, 其励磁电流在 $4\ kA$ 以上, 如果以灭磁时 Z_nO 阀片残压为

$U_R=2.2\text{ kV}$ 计算,空载误强励时过电压达 1.3 倍计算^[16],其对应的强励电压约为 $U_0=2.2\text{ kV}$ ($1243\times\sqrt{2}\times 1.3=2262$), 设整流交流侧相电压幅值为 A , 则

$$U_0 = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \sqrt{3}A \sin(\omega t + \frac{\pi}{3}) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} A \quad (1)$$

此时整流交流侧相电压幅值为 $1\ 330\text{ V}$, 在正常工作情况下, 三相整流电路在 0° 触发角, 纯电感负载情况下整流输出电压 U 进行傅里叶分析可得

$$U = 2200 + 125.714 \cos(6\omega t) - 30.769 \cos(12\omega t) + 13.622 \cos(18\omega t) \quad (2)$$

则在正常情况下, 通过 1-2-3-4 回路, 各高次谐波给两个主电容充电, 其电压平均值为 $2\ 203.8\text{ V}$, 为事故灭磁时刻做准备。

当发电机开始灭磁时, 停止整流电路触发脉冲, 并打开全控型器件 GTO, 形成如图 3 (a) 所示的电路模型, 此时励磁主回路电流为 I , 并对该电路进行拉普拉斯变换, 则

$$I = 2 \frac{U_{ac} - 1101.9/s}{R_1 + 1/sc_1} + \frac{U_{ac}}{R_2} + \frac{U_{ac} + 13000s}{sL} \quad (3)$$

此时, 由图 4 I 关于时间 t 的函数曲线得, 当 $t=0.006\ 5\text{ s}$ 时, 电流降为零, 此时励磁主回路开关打开, 形成了如图 3 (b) 的电路模型, 当 $\Delta t=0.063\ 5\text{ s}$ 时, 主电容建压 $1\ 174.4\text{ V}$, 达到非线性灭磁电阻导通条件并启动, 从开始灭磁到非线性电阻启动所用时间为 0.07 s , 实现非线性电阻的快速启动, 达到了快速灭磁的目的。

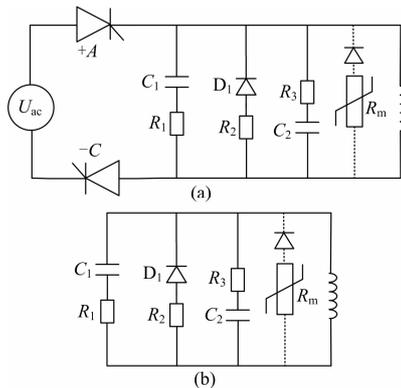


图 3 灭磁过程图

Fig. 3 Diagram of demagnetization process

5 新型灭磁方案仿真

发电机灭磁过程是一个复杂的机电过程, 需将各灭磁原件理想化处理, 大型发电机系统仿真, 空载误强励状态按照额定励磁电流的 3 倍计算, 约为

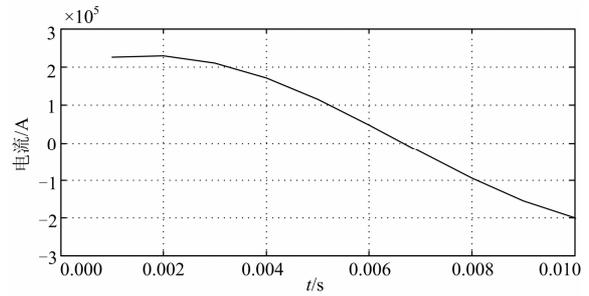


图 4 电流变化曲线图

Fig. 4 Graph of current change

$13\ 000\text{ A}$ ^[17]。根据以上分析, 运用 Matlab 对该灭磁系统进行仿真。

励磁主回路电压电流曲线如图 5 所示, 当励磁系统在 2.16 s 达到大型发电机空载误强励状态后, 开始启动发电机软开关灭磁系统, 在电流换流电路和软开关的双重作用下, 电流迅速降为零, 此时拉开励磁主回路开关 MK, 虽然同样产生了 $6.5\times 10^4\text{ V}$ 的过电压, 但此时电流已经降为零, 在拉开主回路开关 MK 时间段内不产生燃弧, 主回路开关 MK 可以安全的打开。

主电容建压图如图 6 所示, 在励磁系统正常工作时, 整流输出电流的高次谐波通过主电容回路为两个主电容充电, 当灭磁开始时, 主电容开始向外放电, 与换流回路一起将励磁主回路电流降为零, 同时励磁绕组反向向主电容开始充电, 当励磁主回

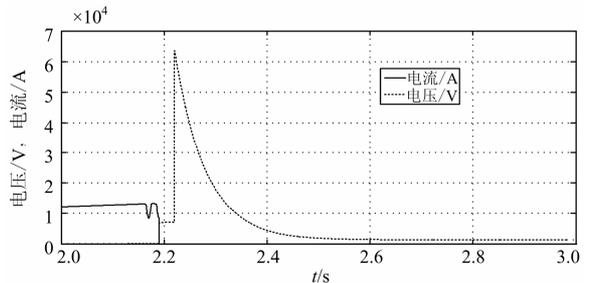


图 5 励磁主回路电压电流曲线

Fig. 5 Voltage and current curve of excitation main circuit

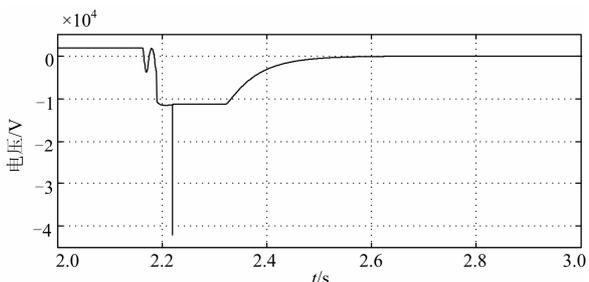


图 6 主电容建压图

Fig. 6 Buildup of voltage in main capacitor

路开关 MK 打开后, 主电容产生足够高的电压, 开始由并联连接切换为串联连接, 并反向放电, 开始消耗内部能量。

励磁等值电感电流波形如图 7 所示, 当在 2.16 s 时达到发电机内部故障事故环境, 通过新型灭磁系统快速实施灭磁, 励磁等值电感电流开始下降, 大约在 2.56 s 时, 完全降为零, 此灭磁过程大约持续 0.4 s 即可完成。

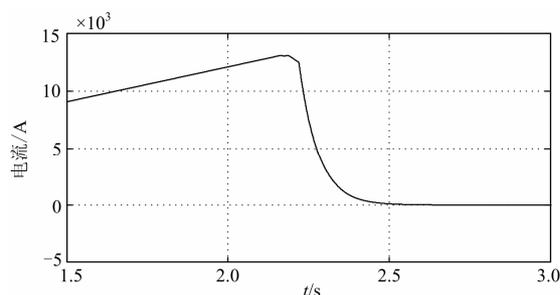


图 7 励磁等值电感电流波形

Fig. 7 Current waveform of magnetizing equivalent inductance

6 结语

按照三峡电厂水轮机发电机组的参数特性, 满足空载额定的理想灭磁条件的事故灭磁的参数配置为 $T_{mo}=0.167T_{do}$, 约为 1.8 s, 事故短路灭磁时间应为 $T'_d/6\approx 0.6$ s 左右, 这是事故灭磁快速有效在两种典型工况下的具体指标, 是合格的事事故灭磁功效的量化指标和衡量准则^[7,18]。根据上述仿真结果可以看出, 在空载误强励状态下灭磁时间约为 0.4 s, 满足事故快速有效灭磁的要求, 可以认为该设计达到了预期的效果。但其不足之处在于, 电路结构由并联切换到串联时, 由于参数设置等因素, 导致两个电容所处支路的电流不同, 在切换时刻后的 0.05 ms 内产生一定的冲击, 对电容的安全造成一定的危害, 需进一步优化系统参数, 有待进一步的研究。

通过对运用的电力器件运行的分析, 充分运用励磁系统的能量, 将励磁整流回路电流中的高次谐波为主电容充电, 不仅提高了励磁设备运行的稳定性, 同时使该灭磁系统时刻处于灭磁准备阶段, 无论何时都能够使该灭磁系统快速地投入, 并能快速实现灭磁, 实现了事故灭磁的最基本的要求。同时有效地证明了新型灭磁建压方案“并联充电, 串联放电”的可行性。

参考文献

[1] 黄大可. 大型发电机内部故障保护技术的难点与突破 [C] // 全国大中型水电厂技术协作网技术交流会, 2009(9): 232-237.
HUANG Da-ke. The difficulties and breakthroughs of

large generator internal fault protection technology[C] // The National Large and Medium-sized Hydropower Technology Collaboration, Technology Exchange Meeting, 2009(9): 232-237.

[2] 陈小明, 胡先洪. 励磁系统交流灭磁技术原理分析[J]. 水电厂自动化, 2006, 9(4): 113-116.
CHEN Xiao-ming, HU Xian-hong. The principle analysis of AC de-excitation technology excitation system[J]. Hydropower Automation, 2006, 9(4): 113-116.

[3] 劳国强, 王川. 大型水轮发电机组灭磁方案研究[C] // 中国水力发电工程学会、电力系统自动化专业委员会、电力系统稳定及发电机励磁系统学科组第三届年会, 2004(8): 29-47.
LAO Guo-qiang, WANG Chuan. The de-excitation scheme of large hydroelectric[C] // China Society for Hydropower Engineering, Power Systems Automation Committee, The Third Annual Meeting of Power System Stability and Generator Excitation System Research, 2004(8): 29-47.

[4] 张烨, 胡书举, 董志然, 等. 电励磁风力发电机组励磁控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 255-260.
ZHANG Hua, HU Shu-ju, DONG Zhi-ran, et al. The excitation control of wind turbine electrical excitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 255-260.

[5] 王强, 王天施, 孙海军, 等. 新型高效率并联谐振直流环节软开关逆变器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 219-226.
WANG Qiang, WANG Tian-shi, SUN Hai-jun, et al. The new high-efficiency parallel resonant soft-switching inverter of DC link[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 219-226.

[6] 何金平, 毛承雄, 陆继明, 等. 电压源型全控器件励磁控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 240-247, 263.
HE Jin-ping, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. Voltage source excitation control strategy of wholly controlled devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 240-247, 263.

[7] 黄大可. 现代电机的柔性灭磁技术[C] // 湖北省电工技术学会、武汉电工技术学会 2008 年学术年会暨理事会换届大会论文集, 2008(增刊): 48-51.
HUANG Da-ke. The flexible de-excitation technology of modern motor[C] // Hubei Province Electrotechnical Society, Wuhan Electrotechnical Society, 2008 Academic Conference and Council Conference Proceedings, 2008(S): 48-51.

[8] 黄大可. 安全快速无限制的柔性灭磁技术[J]. 水力发

- 电, 2010, 36(3): 81-83.
HUANG Da-ke. Study on flexible de-excitation technique[J]. Water Power, 2010, 36(3): 81-83.
- [9] 陈刚, 杨国辉. 一次大联锁试验中灭磁开关拒动的分析及处理[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 222-223.
CHEN Gang, YANG Guo-hui. Analysis of a large trial excitation switch interlock tripping and treatment[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 222-223.
- [10] 赵平, 姚伟, 王少荣, 等. 采用协同控制理论的同步发电机非线性励磁控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 1-7.
ZHAO Ping, YAO Wei, WANG Shao-rong, et al. The synchronous generator non-linear excitation control by collaborative control theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 1-7.
- [11] 吴跨宇, 周平, 高春如, 等. 基于空载误强励灭磁对发电机过电压保护整定的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 98-101.
WU Kua-yu, ZHOU Ping, GAO Chun-ru, et al. The research based on unloaded mistakenly strong de-excitation of generator overvoltage protection setting[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 98-101.
- [12] LEE F C. High-frequency quasi-resonant and multi-resonant converter technologies[C] // Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, 1988: 509-521.
- [13] BOSE B K. Evaluation of modern power semiconductor devices and future trends of converters[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1992, 28(2): 403-413.
- [14] EMADI A, LEE Y J, RAJASHEKARA K. Power electronics and motor drivers in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles[M]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2237-2245
- [15] HUA Gui-chao, LEE F C. Soft-switching techniques in PWM converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42(6): 595-603.
- [16] 劳国强, 王川. 三峡工程水轮发电机组灭磁方案研究[J]. 中国电力, 2005, 38(1): 42-47.
LAO Guo-qiang, WANG Chuan. The de-excitation scheme of the Three Gorges hydroelectric generating[J]. Electric Power, 2005, 38(1): 42-47.
- [17] 吴跨宇, 杨涛. 灭磁仿真计算与灭磁回路性能参数校核分析[J]. 浙江电力, 2010(5): 1-5.
WU Kua-yu, YANG Tao. The simulation of de-excitation and its analysis of the checked performance parameters[J]. Zhejiang Electric Power, 2010(5): 1-5.
- [18] 方思立, 刘增煌, 朱方发. 电机灭磁速度与机组损坏程度的关系分析[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 210-212.
FANG Si-li, LIU Zeng-huang, ZHU Fang-fa. Analysis of the relationship between the speed of the de-excitation of motor and degrees of damage[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 210-212.

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-09-02

作者简介:

朱建行(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向电力电子与电力传动;

谭亲跃(1975-), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制、电能质量。E-mail: qinyuetan@126.com