

并联补偿电容对限流器运行影响的仿真研究

金鑫, 江道灼

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 当发生短路故障时, 限流器通过插入等效限流电抗来限制短路电流。此等效限流电抗主要是感性的, 因此与系统中的容性负载作用可能发生谐振, 产生不利影响。对感性负载带并联补偿电容的情况下, 新型桥式固态限流器(不带旁路电感和带旁路电感)采用预触发与不采用预触发时的运行工况及是否会产生谐振进行了理论分析与比较, 并通过系统仿真对分析结果进行了验证。

关键词: 电力系统; 短路故障; 新型桥式固态限流器; 并联补偿电容; 谐振

Simulation research on the effect of the paralleled compensating capacitor on the solid state fault current limiter operation

JIN Xin, JIANG Dao-zhuo

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The fault current limiter inserts the impedance to limit the fault current when the fault happens. Since the limiting impedance is inductive, it may bring the resonance with capacitive load and does harm to power system. In the paper, in the situation of paralleling a compensating capacitor with the inductive load, the operation and resonance situation is compared and analyzed theoretically when the new bridge type solid-state fault current limiter (both with paralleled inductance and not) is pre-triggered or not. It is proved to be valid through system simulation.

Key words: power system; short circuit; bridge type solid-state fault current limiter; paralleled compensating capacitor; resonance

中图分类号: TM711, TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)04-0054-04

0 引言

近年来电网规模不断扩大, 系统短路容量逐渐增加, 尤其在重负荷地区, 短路电流已经达到甚至超过开关设备的遮断容量。为了解决这一问题, 研究快速、有效的限制短路电流装置成为当前的热点, 研发出了多种故障限流器样机^[1-9], 如超导限流器(SFCL)、磁元件限流器、PTC电阻限流器、混合式限流器以及固态限流器(SSFCL)等。

限流器在电网发生短路时, 快速在故障回路中插入等效限流阻抗以达到限制故障电流的目的。这一等效限流阻抗一般以感抗为主(也有少部分为电阻性的), 这个感性的限流阻抗与容性电抗作用极有可能产生不利影响。电力系统中的容性电抗主要有两种情况: 一是长距离高压输电系统的线路串联补偿; 二是各种并联无功功率补偿设备, 包括并联电容补偿及静止补偿等。本文以浙江大学提出的变压器耦合新型桥式固态限流器(不带旁路电感和带旁路电感)为例, 就并联补偿电容对限流器运行的影

响进行仿真分析。

1 负荷阻抗特性及系统模型

电力系统的负荷常用 $P+jQ$ 的综合负荷模型^[10,11]表示, 综合负荷模型可分为动态模型和静态模型两类。动态模型一般描述电压和频率急剧变化时, 负荷有功和无功功率随时间变化的动态特性。静态模型则描述有功和无功功率稳态值和电压、频率的关系。当电源频率不变时, 负荷静态特性只是电压的函数, 称为负荷的静态电压特性; 若电压不变, 负荷静态特性只是频率的函数, 称为负荷的静态频率特性。综合负荷静态模型一般用于电力系统稳态运行的计算, 也可用于电压和频率变化缓慢的暂态过程计算。

本文在研究感性负载带并联补偿电容对新型桥式固态限流器运行影响时, 不打算对负荷作详细的分类和建模, 因为这本身就是一项复杂的工作^[10-13]。为了分析简便, 本文中负荷将采用恒定阻抗的模型, 这是由于在限流器启动和正常运行的时

候, 限流器对系统的电压和频率一般不会产生明显的影响, 而在发生短路故障时, 负荷已经被短接, 采用详细的负荷模型意义也不大。当然这仅限于简单网络的情况, 对于复杂网络暂不作讨论。根据以上分析, 得出基于变压器耦合固态限流器系统模型(包括负载阻抗模型)如图1所示。

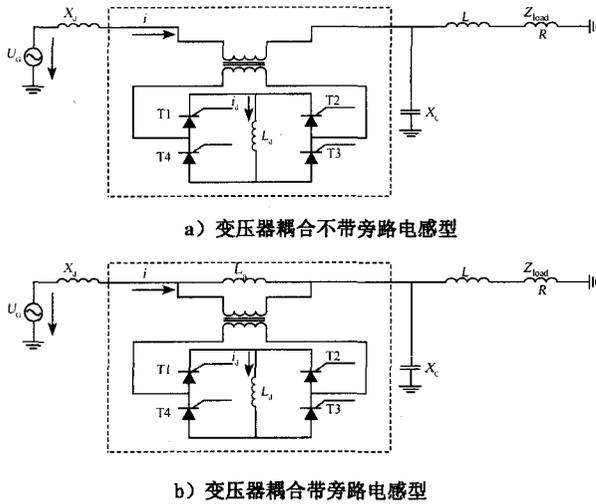


图1 系统模型

Fig.1 System topology

2 理论研究

新型桥式固态限流器应用于电力系统短路限流时, 可能由于系统的负荷阻抗特性或限流器装置自身异常退出给系统运行带来不利影响。

预触发控制策略即指在合上负载开关前固态限流器整流桥先触发导通。在限流器桥路未触发时, 耦合变压器的副边相当于开路状态。由文献[14]可知, 在纯电容负载试验中, 在固态限流器未采用预触发控制策略和不带旁路交流限流电感时, 导致限流器投运后耦合变压器饱和, 与纯电容负载发生串联铁磁谐振的现象。通过采用预触发控制策略、耦合变压器原边并联阻尼电阻或采用带旁路交流限流电感的拓扑结构均可有效消除谐振。实际上, 纯电容负载并不多见, 然而有串、并联电容补偿的情况是较多的。在限流器投运时若不采取预触发控制策略, 仍然存在谐振的可能。

对于采用预触发控制策略的情况, 负荷带并联补偿电容对不带旁路电感的新型桥式固态限流器和带旁路电感的新型桥式固态限流器故障限流的影响也是不一样的, 分析如下。

系统发生短路时, 新型桥式固态限流器在一个周波以内将插入稳态限流电抗(即耦合变压器副边开路)。对于单个负载的情况, 并联补偿电容此时也

被短路了, 它对限流器的限流效果没有影响, 在断路器切断负载后, 整个回路都断开; 但对于断路器装设于补偿电容之后的情况(如母线上安装并补, 多个负载), 负载断路器切断负载后将形成限流电抗和补偿电容的串联, 其等效电路(以不带旁路电感限流器为例)如图2所示。

限流电抗的大小根据限流要求确定(与负荷大小有关), 补偿额度则根据负荷大小和功率因素确定。

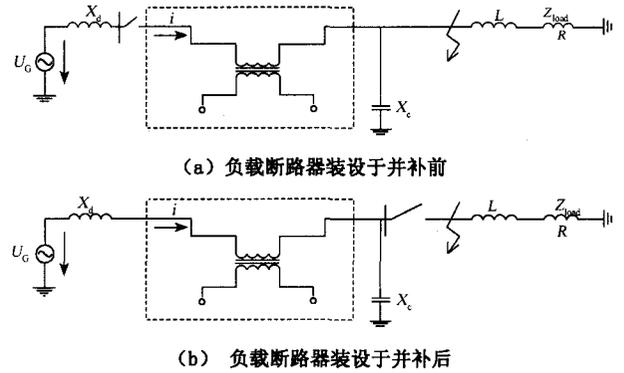


图2 新型桥式固态限流器故障限流等效电路

Fig.2 Equivalent current-limiting circuit of the new bridge type fault current limiter

对于不带旁路电感的新型桥式固态限流器而言, 其稳态限流电抗主要为耦合变压器原边等效阻抗, 与补偿电容串联时一般是满足铁磁谐振发生的必要条件的: $\omega L_0 > 1/\omega C$, ωL_0 为耦合变压器未饱和时原边等效阻抗, 回路容易发生铁磁谐振, 并产生较大的谐振过电压和过电流。而对于带旁路电感的新型桥式固态限流器拓扑, 旁路限流电抗和负载补偿容抗一般相差较大, 几乎不可能发生电感-电容的串联谐振。

按照系统稳态短路限流倍数 K 的要求, 其稳态限流电抗为:

$$X_{\text{fel}} = \omega L_{\text{fel}} = \frac{Z_1}{K} \quad (1)$$

根据负荷功率因数及补偿后功率因数的要求有:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{U^2}{|Z_1|} & Q_c &= U^2 \omega C \\ \frac{S_1 \sin \varphi - Q_c}{S_1 \cos \varphi} &= \tan \varphi' \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\Rightarrow Q_c = S_1 \sin \varphi - S_1 \cos \varphi \tan \varphi'$$

式中: S_1 为负荷视在功率, Q_c 为补偿容量, $\cos \varphi$ 为负荷功率因数, $\cos \varphi'$ 为要求的补偿后功率因数。

由上两式可得限流电抗和补偿电容的串联谐振

点应满足式:

$$\left. \begin{aligned} \omega L_{fel} &= 1 / \omega C \\ \frac{|Z_1|}{K} &= \frac{U^2}{KS_1} \\ \frac{1}{\omega C} &= \frac{U^2}{S_1 \sin \varphi - S_1 \cos \varphi \tan \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{K} = \frac{1}{\sin \varphi - \cos \varphi \tan \varphi}$$

由式(3)可以看出,限流电抗和补偿电容是否发生串联谐振,与短路电流倍数和负载补偿前后的功率因数有关,因为电容只能发出无功功率,所以右边分母大于零且小于1,而 $K > 1$ (通常5以上),故限流电抗和补偿电容几乎不可能发生串联谐振。也可以这样理解:补偿容抗不会小于负载阻抗(由各自视在功率满足 $U^2/Z_c \leq U^2/Z_L$ 可得),而限流电抗却比负载阻抗小的多,显然它们是不可能发生串联谐振的。

3 仿真分析

对图1所示的系统模型,采用按常规设计的变压器耦合桥式固态限流器(不带旁路电感和带旁路电感),并对感性负载带并联补偿电容下的限流器工作状况作仿真研究。仿真电路如图3所示。

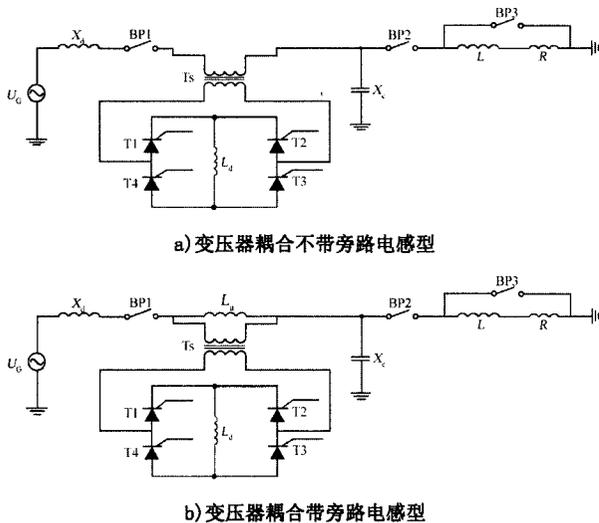
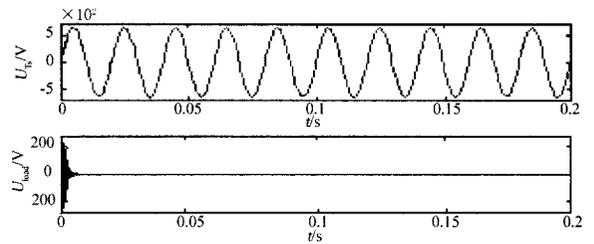


图3 并联补偿电容对固态限流器运行影响仿真电路图

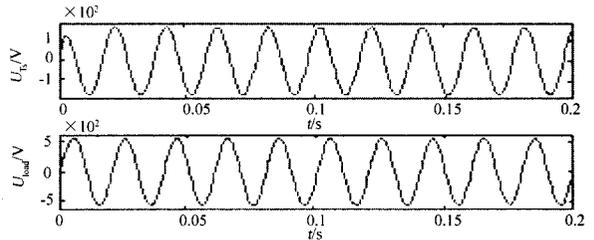
Fig.3 Simulation circuit diagram on the effect of the paralleled compensating capacitor on SSFCL

电路参数设置如下:系统额定电压峰值 $U_G=110$ kV/1.732, $f=50$ Hz; 负载 $L=0.001$ H, $R=50$ Ω ; 补偿电容 $C=0.000001$ F; 直流限流电感 $L_d=0.001$ H; 常规耦合变压器 110/110 kV, 容量 250 MVA。可得出不采用预触发策略和采用预触发策略时限流器投

运仿真结果分别如图4、图5所示。

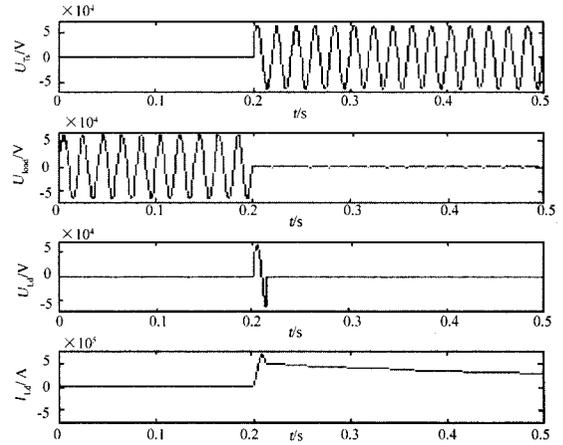


a) 无旁路电感, 常规变压器耦合, 未发生谐振

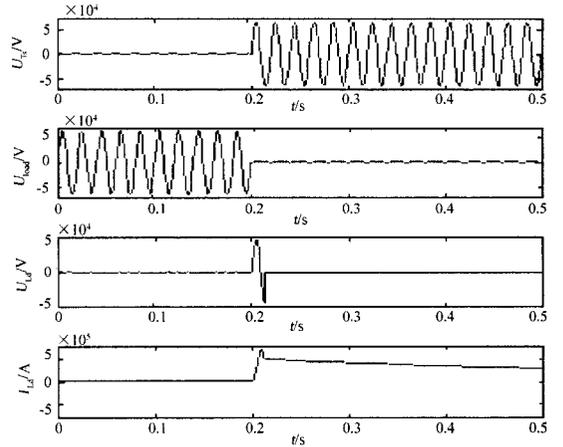


b) 带旁路电感, 常规变压器耦合, 负载基本正常运行

图4 不采用预触发策略时固态限流器投运仿真结果
Fig.4 Simulation results of the SSFCL without pre-triggering



a) 不带旁路电感, 常规变压器耦合



b) 带旁路电感, 常规变压器耦合

图5 采用预触发策略时固态限流器投运仿真结果
Fig.5 Simulation results of SSFCL with pre-triggering

从仿真波形可看出在感性负载带并联补偿电容的情况下, 即使不采用预触发控制策略, 两种限流器投运均不会出现谐振现象, 但只有带旁路电感时, 负载运行基本正常, 而不带旁路电感时实际负载电压则远小于正常情况的电压。采用预触发控制策略后, 限流器投运和正常运行对系统均没有明显影响。感性负载对两种限流器拓扑的限流效果也没明显影响。

采用预触发策略投运、0.2 s 短路限流及 0.5 s 负载切除的仿真结果如图 6 所示:

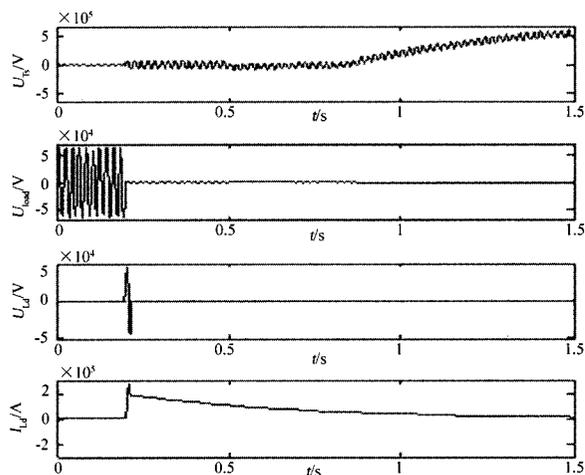


图 6 采用预触发策略投运、短路 (0.2 s 时) 限流及负载切除 (0.5 s 时) 后与并联补偿电容串联发生谐振的仿真结果

Fig.6 Simulation results of the resonance with the paralleled compensating capacitor after being pre-triggered, limiting the fault current as 0.2 s and cutting the loads at 0.5 s

从图 6 可以看出若在负载断路器切除短路负载后, 使限流器与补偿电容串联时, 对于带旁路电感的限流器而言, 不会发生旁路电感与补偿电容的谐振现象; 但对不带旁路电感的变压器耦合固态限流器而言, 则容易发生铁磁谐振, 产生较大的谐振过电压和过电流。

4 结语

限流器的感性限流阻抗与容性电抗作用极有可能产生不利影响。本文对变压器耦合新型桥式固态限流器 (不带旁路电感和带旁路电感) 采用预触发与不采用预触发时的运行工况及是否会产生谐振进行了理论分析与比较, 并通过系统仿真对分析结果进行了验证。可以看出, 带旁路电感新型固态限流器采用预触发控制时, 发生谐振的可能性小, 工作运行及切除故障效果最优。

参考文献

[1] Boeing H J, Psic D A. Fault-current Limiter Using a

Superconducting Coil[J]. IEEE Trans on Magnetic, 1983, 19(3): 1051-1053.

[2] Mukhopadhyay S C, Dawson F P, Lwahara M, et al. A Novel Compact Magnetic Current Limiter for Three Phase Applications[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2000, 36(5): 3568-3570.

[3] Karady G G. Principles of Fault Current Limitation by a Resonant LC Circuit[J]. IEEE Proceedings-C, 1992, 139(1): 1-6.

[4] 陈刚, 江道灼, 吕征宇, 等. 一种新型固态短路限流器拓扑及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 32-36.

CHEN Gang, JIANG Dao-zhuo, Lü Zheng-yu, et al. A Novel Topology of Solid State Fault Current Limiter and Its Control Strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 32-36.

[5] 张鹏飞, 江道灼, 刘华蕾. 带旁路限流电感的新型固态限流器试验研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 67-71.

ZHANG Peng-fei, JIANG Dao-zhuo, LIU Hua-lei. Experimental Study on the Solid Fault Current Limiter with Bypass Inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 67-71.

[6] 杨勇. 超导技术的发展及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 48-50.

YANG Yong. Development of Superconducting Technique and Its Application in Power System[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 48-50.

[7] 张绪红, 周有庆, 吴桂清, 等. 饱和铁心型超导限流器的仿真设计方法[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 49-52.

ZHANG Xu-hong, ZHOU You-qing, WU Gui-qing, et al. A New Design Method for Saturated Core Superconducting Fault Current Limiter[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 49-52.

[8] 曾琦, 李兴源, 温海康. 采用脉宽调制控制的新型故障限流器[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 20-23.

ZENG Qi, LI Xing-yuan, WEN Hai-kang. A New Type of Fault Current Limiter Controlled by Pulse Width Modulation[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 20-23.

[9] 费万民, 张艳丽, 吕征宇. 基于 IGCT 的三相接地系统故障限流器及其控制策略[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 82-86.

(下转第 61 页 continued on page 61)

AGC 策略的制定也有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 周京阳, 于尔铿. 能量管理系统(EMS):第 5 讲 自动发电控制[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(5): 75-78.
ZHOU Jing-yang, YU Er-keng. Energy Management System(EMS): Part Five: Automatic Generation Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(5): 75-78.
- [2] 张小白, 高宗和, 等. 用 AGC 实现稳定断面越限的预防和校正控制[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 55-59.
ZHANG Xiao-bai, GAO Zong-he, et al. Implementation of Preventive and Remedial Control for Tie Line Overload by Use of Automatic Generation Control[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 55-59.
- [3] 张海燕, 李俊. 火电厂 AGC 的试验与分析[J]. 计算技术与自动化, 2006, 25(4): 108-111.
ZHANG Hai-yan, LI Jun. Experiment and Analysis of AGC of the Coal-fired Power Plant[J]. Computing Technology and Automation, 2006, 25(4): 108-111.
- [4] 高宗和, 丁恰, 温柏坚, 等. 利用超短期负荷预报实现 AGC 的超前控制[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 42-44.
GAO Zong-he, DING Qia, WEN Bo-jian, et al. AGC-in-advance Based on Super-short-term Load Forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 42-44.
- [5] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 准稳态灵敏度的分析方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 9-13.
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. New Sensitivity Analysis Method Under Quasi-steady-State for Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 9-13.
-
- 收稿日期: 2008-03-19; 修回日期: 2008-04-10
作者简介:
陈楷(1980-), 男, 硕士, 工程师, 从事电网调度自动化的研究与运行工作; E-mail: kane_ok@263.net
孙建华(1976-), 男, 工程师, 从事电网调度自动化的研究与运行工作;
王卉(1978-), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统运行与控制研究工作。
-
- (上接第 57 页 continued from page 57)
- FEI Wan-min, ZHANG Yan-li, LU Zheng-yu. IGCT-Based Fault Current Limiter for Three-Phase Power System with Grounded Neutral and Its Control Strategy[J]. Power System Technology, 2006,30(11): 82-86.
- [10] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] 鞠平, 戴琦, 黄永皓, 等. 我国电力负荷建模工作的若干建议[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 8-12.
JU Ping, DAI Qi, HUANG Yong-hao, et al. Some Advice on Modeling of Our Country[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 8-12.
- [12] 汤涌, 候俊贤, 刘文革. 电力系统数字仿真负荷建模中配电网及无功补偿与感应电动机的模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 8-12.
TANG Yong, HOU Jun-xian, LIU Wen-zhuo. The Modeling of Distribution Network and Var Compensator and Induction Motor in the Load Model for Power System Digital Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 8-12.
- [13] 傅旭, 王锡凡. 含限流器的电力系统断相加短路故障计算相补偿法[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 36-38.
FU Xu, WANG Xi-fan. A Phase Domain Compensation Method for Calculating Open Conductor Plus Short Circuit Fault with Fault Current Limiters[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 36-38.
- [14] 江道灼, 陈永刚, 李电, 等. 变压器耦合固态限流器的纯电容负载试验[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 65-70.
JIANG Dao-zhuo, CHEN Yong-gang, LI Dian, et al. Experimental Study of Transformer Coupling Solid State Fault Current Limiter with Capacitance Load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 65-70.
-
- 收稿日期: 2008-04-07; 修回日期: 2008-04-23
作者简介:
金鑫(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障限流技术; E-mail: jxjasly@126.com
江道灼(1960-), 男, 教授, 主要研究方向是交直流电力系统运行与控制技术, 电力电子及柔性交流输电应用技术、电力系统现场智能测控技术及配电网自动化技术等。