

静止同步串联补偿器的启停策略

黄如海,曹冬明,董云龙,潘磊,邱德锋,卢宇

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

摘要:静止同步串联补偿器(SSSC)因启动困难问题一直制约其工程应用和发展。提出一种可转换的带外接充电支路的SSSC电路,将其充电状态和正常运行状态设计为2种不同的工作模式;详细分析基于上述电路的SSSC启停方案,即基于网侧旁路开关的“零电流分”启动策略和“零电压合”停运策略,实现SSSC启停过程中系统的稳定;最后,在南京220 kV西环网统一潮流控制器(UPFC)工程上验证了所提SSSC启停策略的正确性。

关键词:静止同步串联补偿器;自励;启动电路;零电流;零电压

中图分类号:TM 762

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.017

0 引言

静止同步串联补偿器SSSC(Static Synchronous Series Compensator)是一种不含外部电源的静止同步无功补偿设备,其串联接入输电线路并产生与线路电流正交、幅值可控的电压,可以实现精确控制线路电流、最大化电网传输能力以及优化潮流的作用^[1-3]。国内外仅有1个独立的SSSC工程已投运。SSSC更多是作为一种辅助运行方式存在于多个统一潮流控制器/可转换静止补偿器(UPFC/CSC)工程中,但极少应用。

目前有关SSSC方面的文献大多聚焦于稳态运行时的控制保护策略研究^[4-8],对基本的启动和停运策略研究鲜有提及。而启动问题一直是SSSC装置难以成为独立工程的难题,特别是随着南京UPFC工程和苏南UPFC工程的投运,模块化多电平换流器(MMC)将越来越广泛地应用于柔性交流输电系统,使得SSSC以独立装置或UPFC的一种运行方式而大规模应用成为可能^[9-10]。因此,对SSSC的启动和停运策略进行研究显得十分迫切和必要。

已投运的西班牙SSSC工程采用的是他励策略,通过增加外接小容量直流电源来维持直流母线电压稳定,一方面这与“不含外部电源”的定义矛盾,另一方面直流源增加了投资成本并降低了可靠性。文献[11-12]提出了2种直流母线电容自励充电的方法,通过多级控制策略将电容电压升压至额定值,但前提均需利用串联变压器励磁电感上的电压不控充电建立起初始电压,在线路潮流较低,特别是线路潮流为0时,该方法完全失效。当SSSC以UPFC或CSC工程的一种运行方式工作时,可以通过其他换流器整流后给直流母线电容充电^[13-15],但是这种方式不如直接以更为强大的UPFC方式运行。

本文提出了一种可转换的带外接充电支路的SSSC电路,通过转换刀闸的切换使得SSSC充电和

运行处于2种模式,从而避免了线路潮流的不确定性和其他换流器或电源可靠性的限制。基于上述电路详细研究了SSSC的平滑启动和停运控制策略,并在南京UPFC工程上进行实际验证。

1 SSSC的结构与工作原理

SSSC是基于同步电压源的串联补偿器,其典型的主电路结构示意图如图1所示。电压源换流器通过变压器 T_1 串联接入输电线路,变压器 T_1 的两侧分别设有旁路开关 QF_1 和 QF_2 。

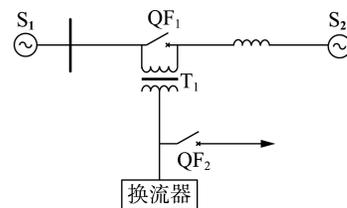


图1 SSSC主电路结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of SSSC's main circuit

由于换流器的直流侧没有电源,若不考虑变压器和换流器的损耗,SSSC串入输电线路的三相电压与线路电流垂直,这等效于在输电线路上串联了1个可控电抗/电容,从而可通过调节串入输电线路的三相电压幅值改变输电线路的有效阻抗,进而达到控制线路潮流的目的。由于这种阻抗补偿基于同步电压源的原理,因此不会和线路的其他电抗产生串联谐振。

从换流器的角度来分析,以换流器的交流侧输出电压的方向为 dq 坐标系的 d 轴方向,则换流器的输出功率与输出电压 U_V 和输出电流 I_V 的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_V = U_{Vd} I_{Vd} \\ Q_V = U_{Vd} I_{Vq} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_V 、 Q_V 分别为换流器的输出有功功率和无功功率; U_{Vd} 为 U_V 的 d 轴分量; I_{Vd} 、 I_{Vq} 分别为 I_V 的 d 、 q

轴分量。

在稳态情况下,SSSC 起串联补偿作用的是无功功率 Q_v ,有功功率 P_v 主要用来补偿换流器的损耗,因此稳态时的直流母线电压可以通过调节 $I_{v,d}$ 来间接控制。直流电压外环的控制框图如图 2 所示,给定的参考值 U_{dc_ref} 与采样值 U_{dc} 的差值通过 PI 调节器得到电流参考值 $I_{v,dref}$,再通过电流内环即可得到换流器控制的输出电压,实现直流母线电压的稳定。

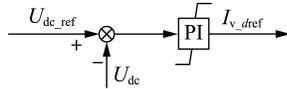


图 2 直流电压外环的控制框图

Fig.2 Block diagram of DC voltage control loop

由于 SSSC 主电路没有接入固定的电压源或电流通源,直流母线电压在 SSSC 启动过程中如何有效建立成为难题。采用分 QF_1 给换流器进行不控充电的方式来建立初始电压,则线路电流和串联变压器的励磁电抗值均直接影响了初始电压的大小。若线路电流较小甚至为 0,则不控充电后的直流母线电压往往达不到最低要求,对驱动电源自取能的拓扑而言,器件甚至不能有效驱动,进而造成后续的启动策略根本无法有效实施。

因此,需要寻求其他简单、有效的方式来实现 SSSC 直流电压的建立和可靠启动。此外,SSSC 在正常投入和退出运行时,如何实现系统无冲击的启动和停运策略也需要研究。

2 SSSC 的启停策略

采用 SSSC 的典型电路难以实现 SSSC 的可靠启动,需要外接直流电源或外加驱动电源。本文提出了一种比较简单的带外接充电支路的 SSSC 电路结构,如图 3 所示。增加的外接充电支路包括 2 个转换刀闸 DS_1 和 DS_2 、1 个充电电阻 R 及其旁路刀闸 DS_3 、1 台并联变压器 T_2 和 1 个断路器 QF_3 。

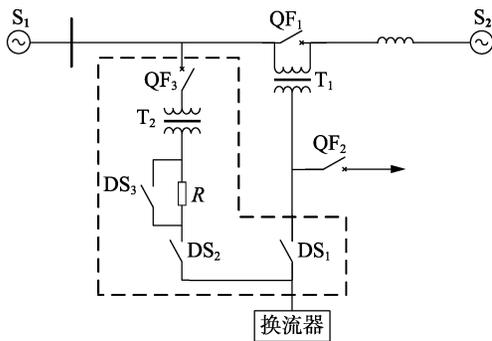


图 3 SSSC 带外接充电支路的结构示意图

Fig.3 Structure diagram of SSSC with external charging circuit

换流器的交流侧通过刀闸 DS_1 接至原有串联侧电路,通过刀闸 DS_2 经充电电阻 R 接入并联变压器 T_2 ,并联变压器 T_2 再通过断路器 QF_3 接至交流母

线。当 SSSC 作为独立工程时,需要增加上述电路的所有设备;当 SSSC 作为 UPFC 或 CSC 的一种运行方式时,只需要增加刀闸 DS_1 和 DS_2 ,与其他换流器共用并联侧电路。增加的电路也可使 SSSC 系统退出运行时,其换流器以静止同步补偿器(STATCOM)运行方式对交流系统进行无功补偿。

2.1 SSSC 的启动策略

采用带外接充电支路的 SSSC 电路后,通过转换刀闸的切换使得 SSSC 充电时的主电路变成了常规的 STATCOM 电路,从而解决了直流电压建立的难题;直流电压建立之后,再通过转换刀闸切换回常规 SSSC 电路,完成后续的启动和正常运行。因此,SSSC 的启动过程可分为 2 个子过程:换流器并联充电过程和换流器串联启动过程分别如图 4 和图 5 所示。

以 MMC 为例,其并联充电过程就是换流器子模块电容电压建立的过程。首先分开 DS_1 、合上 DS_2 ,将换流器连接至充电电路;充电电阻的旁路刀闸 DS_3 分开,准备给换流器充电。然后合上并联变压器网侧断路器 QF_3 对换流器进行不控充电,通过充电电阻抑制充电电流,避免直流电压建立过程对系统和换流器产生冲击。在不控充电完成后,将换流器以 STATCOM 的方式解锁运行,进一步将换流器的子模块电容电压充电至额定值。最后,换流器闭锁,分开 DS_2 、合上 DS_1 ,将换流器切换至串联侧电路,等待串联侧启动。

换流器的串联启动过程需要考虑 SSSC 装置投

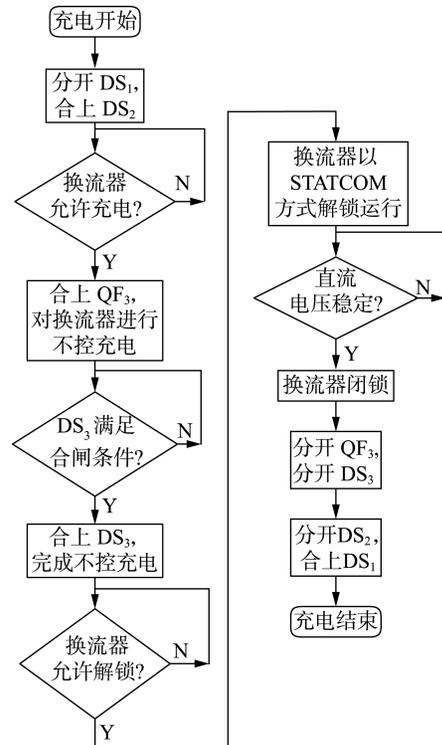


图 4 换流器并联充电流程图

Fig.4 Flowchart of converter's parallel charging

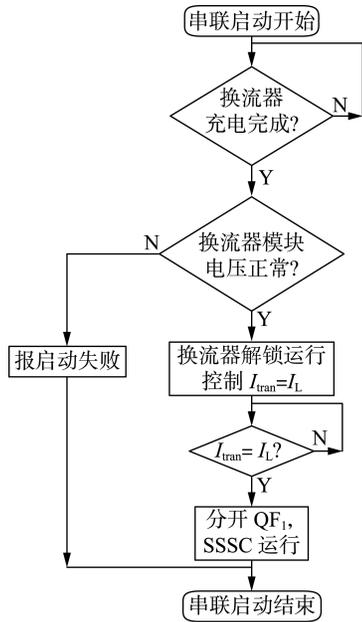


图 5 换流器串联启动流程图

Fig.5 Start-up flowchart of series converter

入电网时潮流变化尽可能小的原则。本文提出了一种零电流分旁路开关的串联启动策略:换流器先通过子模块电容残留的电压进行零功率解锁运行;然后通过控制将串联变压器网侧绕组的电流从 0 按一定的速率升至线路电流,使得线路潮流全部转移至串联变压器的网侧绕组;最后在零电流情况下分开网侧旁路开关,完成串联启动过程。由于分开网侧旁路开关前、后线路电流保持不变,所以 SSSC 的启动过程对系统零冲击。启动完成后,换流器切换为 SSSC 正常运行的控制策略对系统潮流进行调节。

启动过程中,串联变压器的网侧电流的控制框图如图 6 所示,图中,下标 $d、q$ 分别表示电流的 d 轴、 q 轴分量。线路电流 I_L 作为参考值与串联变压器网侧绕组电流 I_{tran} 的差值通过 PI 调节器得到阀侧电流参考值 I_{v_ref} ,再通过电流内环得到换流器控制的输出电压,实现了旁路开关电流的完全转移。

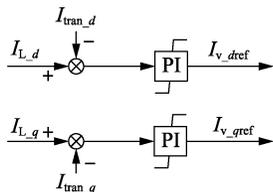


图 6 启动过程中网侧电流控制框图

Fig.6 Block diagram of grid-side current control in start-up process

换流器在充电和串联启动这 2 个过程的衔接中,因子模块电容一直在放电,需要在一定时间内完成切换。切换过程中必要的刀闸倒换时间 t_s 如式(2)所示。

$$t_s = t_{QF3_OPEN} + t_{DS2_OPEN} + t_{DS1_CLOSE} \quad (2)$$

其中, t_{QF3_OPEN} 为开关 QF_3 的分闸时间; t_{DS2_OPEN} 为刀

闸 DS_2 的分闸时间; t_{DS1_CLOSE} 为刀闸 DS_1 的合闸时间。

子模块电容的允许放电时间 t_c 由与其并联的放电电阻阻值 R_c 和自身的容值 C_c 决定,见式(3)。

$$t_c = \frac{R_c R_q}{R_c + R_q} C_c (\ln U_{c_nom} - \ln U_{c_min}) \quad (3)$$

其中, R_q 为驱动电源的等效阻抗; U_{c_nom} 为电容电压额定值; U_{c_min} 为保证子模块驱动正常供电的最小电压。

进行子模块电容和放电电阻参数设计时,必须满足 $t_c > t_s$ 并留足裕量。同时为了保证切换时间可控,建议衔接过程设计为程序顺控自动操作。

2.2 SSSC 的停运策略

SSSC 的停运策略主要考虑的是如何对电网系统以最小冲击退出 SSSC 装置。本文提出了一种零电压合旁路开关和零电流换流器闭锁的 SSSC 停运策略,如图 7 所示。

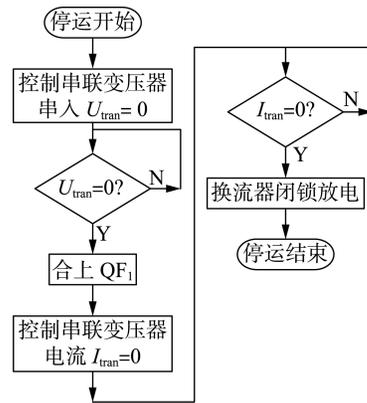


图 7 SSSC 停运流程图

Fig.7 Shutdown flowchart of SSSC

SSSC 的停运过程首先控制串联变压器串入的网侧电压为 0,从而将线路潮流还原至自然潮流状态,然后再零电压合上串联变压器的网侧旁路开关;旁路开关合上后,将串联变压器的网侧电流以一定速率降低至 0,从而将潮流全部转移至旁路开关,最后再将换流器闭锁进行放电,完成整个停运过程。由于合上网侧旁路开关前后其电压压降保持为 0,所以 SSSC 的停运过程对系统零冲击。

停运过程中,串联变压器的网侧电压和网侧电流控制框图如图 8 所示。图中, QF_{1open} 为网侧旁路开关的分位状态。在网侧旁路开关分开时,选择参考

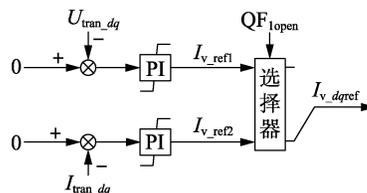


图 8 停运过程网侧电压、电流控制框图

Fig.8 Block diagram of grid-side current and voltage control in shutdown process

值 0 与串联变压器网侧绕组电压 U_{tran} 的差值经过 PI 调节器得到 $I_{\text{v,ref1}}$ 作为阀侧电流参考值;在网侧旁路开关合上后,选择参考值 0 与串联变压器网侧绕组电流 I_{tran} 的差值经过 PI 调节器得到 $I_{\text{v,ref2}}$ 作为阀侧电流参考值。通过上述控制实现了 SSSC 的平滑停运过程。

3 试验验证

为了验证带外接充电支路的 SSSC 启停策略的正确性,在南京 UPFC 工程的系统试验阶段进行了相关试验。南京 UPFC 工程的主要电气参数如表 1 所示。

表 1 南京 UPFC 工程的主要电气参数

主设备	电气参数	额定值
串联变压器	容量	70 MV·A×2
	变比	26.5 kV/20.8 kV
并联变压器	容量	60 MV·A
	变比	35 kV/20.8 kV
MMC	容量	60 MV·A×3
	电容电压	1 538 V
	直流电压	±20 kV
	允许放电时间	132 s

注:南京 UPFC 工程的并联变压器网侧接至 35 kV 母线。

换流器接至并联侧以 STATCOM 解锁运行的波形如附录中的图 A1 所示。图中,阀侧电流 I_{v} 和阀侧电压 U_{v} 分别为换流器交流输出端电流和电压;直流电压 U_{D} 为换流器直流输出端电压;电容电压平均值为换流器单个桥臂所有子模块的平均电容电压;解锁信号为换流器解锁运行状态。为了减小解锁瞬间对交流系统的冲击,采用直流降压解锁,稳定后再按一定速率升至额定值。当直流电压稳定之后,换流器的子模块电容电压也稳定至额定值 1 538 V 附近。

换流器接至串联侧后启动的波形如附录中图 A2 所示。图中,线路有功功率、无功功率和电流 I_{L} 分别为 SSSC 接入点线路侧的有功功率、无功功率和电流 I_{L} ; QF_1 合位为串联变压器网侧旁路开关的合位位置状态。换流器并联转至串联过程采用了顺控自动操作,整个过程约 18 s,远小于允许放电时间,换流器解锁前子模块电容电压下降幅度较小。换流器解锁后,先将线路电流 I_{L} 全部转移到串联变压器网侧绕组上,然后再零电流分开 QF_1 。由于系统阻抗的接入, QF_1 分开后线路潮流会有小的波动,但很快被调整至稳定。

附录中的图 A3 给出了 SSSC 稳态运行时的波形,线路有功功率被精确控制为 200 MW,直流电压为 40 kV 额定工况。在 SSSC 正常运行时,换流器可以直接从线路中吸收有功功率,从而通过直流电压控制策略维持直流电压稳定。

由于串联变压器网侧绕组没有跨接电压互感器,实际工程使用阀侧电压 U_{v} 替代变压器网侧绕组电压 U_{tran} 进行控制。SSSC 停运的波形如附录中的图 A4 所示。图中,启停信号为 SSSC 串联侧启动或停运过程状态,分为 2 个阶段。

(1)第 1 阶段:控制阀侧电压 U_{v} 为 0 后合上 QF_1 ,如图 A4(a)所示。合上 QF_1 时,虽然串联变压器网侧绕组电流 I_{tran} 仍然保持不变,但由于串联变压器的漏抗被旁路,线路电流 I_{L} 有所增大,造成线路潮流略有扰动。

(2)第 2 阶段:串联变压器网侧绕组电流 I_{tran} 转移至旁路开关后换流器零电流闭锁,如图 A4(b)所示。

为了更准确地验证停运策略的正确性,在 RTDS 实时仿真系统上采用 U_{tran} 控制进行了仿真试验,仿真结果如图 A4(c)所示。由图可见,合上 QF_1 时线路电流几乎没有变化。

4 结语

本文提出了一种可转换的带外接充电支路的 SSSC 电路,其可以解决独立 SSSC 工程启动困难的难题,同时又可转换为 STATCOM 的运行方式,提高了设备可用性,相比于常规的他励方案成本低、结构简单且运行灵活。

通过详细分析采用带外接充电支路电路的 SSSC 启停方案,研究了基于串联变压器网侧旁路开关的“零电流分”启动和“零电压合”停运策略,保证了 SSSC 投入和退出对系统的最小冲击,最后,在南京 220 kV 西环网 UPFC 工程上验证了本文所提 SSSC 启停策略的正确性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] SEN K. SSSC-static synchronous series compensator: theory, modeling, and applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 241-246.
- [2] 何大愚. 柔性交流输电技术及其控制器研制的新发展——TCPST, IPC(TCIPC) 和 SSSC[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(6): 1-6.
HE Dayu. Facts technology and new progress in the development of its controllers—TCPST, IPC(TCIPC) and SSSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 1-6.
- [3] 周俊宇. 静止同步串联补偿器在电力系统中的应用综述[J]. 电气应用, 2006, 25(4): 51-54, 121.
ZHOU Junyu. Review of the applications of static synchronous series compensator in power system[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(4): 51-54, 121.
- [4] 张帆, 徐政. 静止同步串联补偿器控制方式及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 75-80.
ZHANG Fan, XU Zheng. Study on control and characteristics of static synchronous series compensator[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2008, 28(19):75-80.
- [5] 刘慧威, 姜旭, 肖湘宁. 基于级联多电平逆变器的静止同步串联补偿器仿真研究[J]. 现代电力, 2006, 23(2):19-23.
LIU Huiwei, JIANG Xu, XIAO Xiangning. The simulation of SSSC based on cascaded multilevel inverter[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(2):19-23.
- [6] 张爱国, 张建华, 蒋程. 静止同步串联补偿器的恒阻抗模型及其双闭环控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(3):106-111.
ZHANG Aiguo, ZHANG Jianhua, JIANG Cheng. Constant-impedance model of static synchronous series compensator and its double closed loop control strategy[J]. Power System Technology, 2010, 34(3):106-111.
- [7] 吴杰康, 蒋程, 张建华, 等. 一种优化系统动态性能的新型 SSSC 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12):156-161.
WU Jiekang, JIANG Cheng, ZHANG Jianhua, et al. A novel static synchronous series compensator control strategy for improving the dynamic performance of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12):156-161.
- [8] 鲁江, 秦健, 潘磊, 等. 南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6):1-5.
LU Jiang, QIN Jian, PAN Lei, et al. Study on architecture and configuration for control and protection system of Nanjing UPFC project[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):1-5.
- [9] 杜翼, 朱克平, 江道灼, 等. 含有限流式静止同步串联补偿器的直流配电网[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8):108-113, 121.
DU Yi, ZHU Keping, JIANG Daozhuo, et al. DC distribution network containing SSSC-FCL[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8):108-113, 121.
- [10] 凌峰, 李九虎, 田杰, 等. 适用于双回线路的统一潮流控制器系统结构优化分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21):113-119.
LING Feng, LI Jiuhu, TIAN Jie, et al. Optimization analysis of UPFC system structure for double-circuit lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21):113-119.
- [11] 姜旭, 肖湘宁, 尹忠东, 等. H 桥级联式 SSSC 直流侧电容值选择及自励启动充能策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3):41-46.
JIANG Xu, XIAO Xiangning, YIN Zhongdong, et al. Selection of DC capacitance and schemes of self-excitation startup charge for the H-bridge cascading SSSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3):41-46.
- [12] 宋方方, 蔡林海, 陆振纲, 等. 级联 H 桥 SSSC 的自励启动方法研究[J]. 智能电网, 2017, 5(6):515-523.
SONG Fangfang, CAI Linhai, LU Zhengang, et al. Research of self-excitation methods to start a cascaded H-bridge SSSC[J]. Smart Grid, 2017, 5(6):515-523.
- [13] 潘磊, 李继红, 田杰, 等. 统一潮流控制器的平滑启动和停运策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12):159-164, 171.
PAN Lei, LI Jihong, TIAN Jie, et al. Smooth start and stop strategies for unified power flow controllers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):159-164, 171.
- [14] 沈忱, 江道灼, 吕文韬, 等. 限流式统一潮流控制器的启停控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22):101-105.
SHEN Chen, JIANG Daozhuo, LÜ Wentao, et al. Start-stop control strategy for UPFC with fault current limiting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22):101-105.
- [15] 黄如海, 杨光, 郭有强, 等. 南京 UPFC 工程母联开关接地故障分析[J]. 供用电, 2017, 34(8):28-32.
HUANG Ruhai, YANG Guang, GUO Youqiang, et al. Analysis of an actual ground fault for Nanjing UPFC Project[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(8):28-32.

作者简介:



黄如海

黄如海(1987—),男,江苏南通人,工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电及柔性交流输电技术等(**E-mail**: huangrh@nrec.com);

曹冬明(1972—),男,江苏泰兴人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统自动化、柔性交直流输电技术等(**E-mail**:

caodm@nrec.com);

董云龙(1977—),男,安徽安庆人,高级工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术等(**E-mail**: dongyl@nrec.com);

潘磊(1985—),男,湖北荆州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电及柔性交流输电技术等(**E-mail**: panl@nrec.com);

邱德锋(1986—),男,江苏泰州人,工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电及柔性交流输电技术等(**E-mail**: qiudf@nrec.com);

卢宇(1979—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术等(**E-mail**: luy@nrec.com)。

Start-up and shutdown control strategy for static synchronous series compensator

HUANG Ruhai, CAO Dongming, DONG Yunlong, PAN Lei, QIU Defeng, LU Yu

(Nanjing Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The application and development of the SSSC (Static Synchronous Series Compensator) are restricted due to the difficulty of its start-up. A novel SSSC circuit with external charging circuit is proposed, whose charging state and normal operation state are designed as two different working modes. The start-up and shutdown control strategy for SSSC is analyzed in detail based on the proposed circuit, i.e. the bypass switch on the grid side is opened while its current is zero in start-up stage, and closed while its voltage is zero in shutdown stage. Therefore, the power of the grid is stable during the whole start-up and shutdown progress of SSSC. Finally, the proposed start-up and shutdown control strategy for SSSC is verified in the 220 kV Nanjing Western UPFC Project.

Key words: static synchronous series compensator; self-excited; start-up circuit; zero current; zero voltage

附录

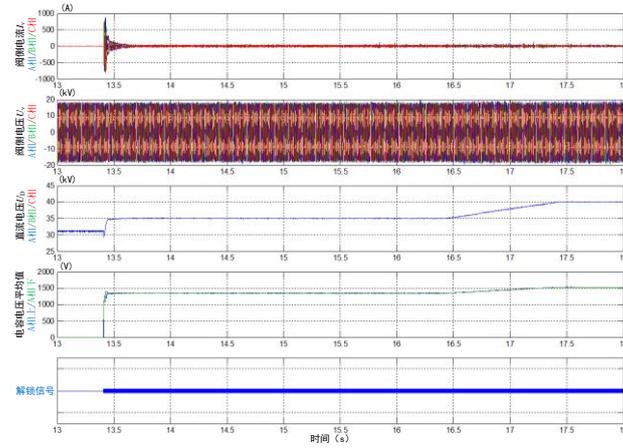


图 A1 并联充电波形图

Fig.A1 Waveforms of grid-side current and voltage control in shutdown process

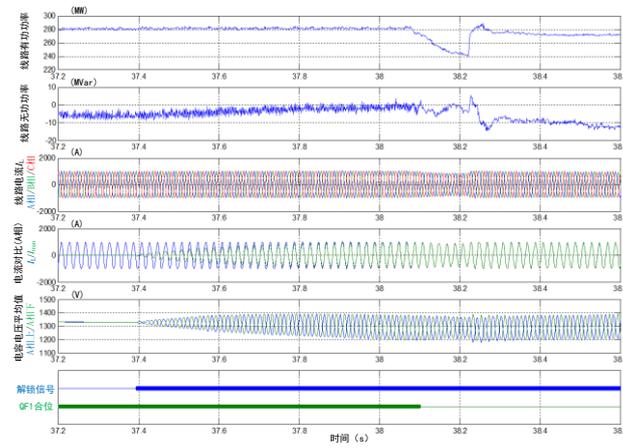


图 A2 SSSC 串联启动过程波形图

Fig.A2 Waveforms during SSSC's start-up process with series transformer

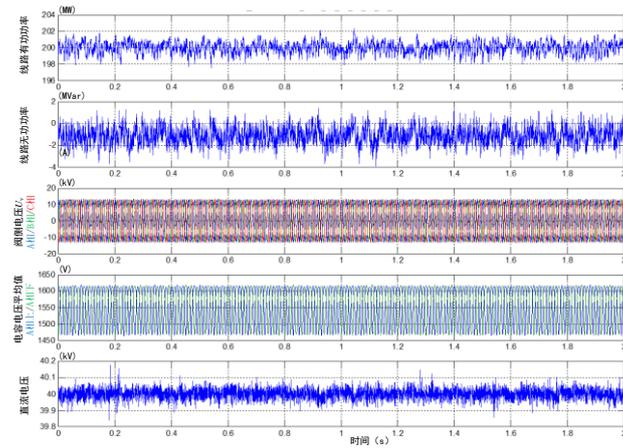
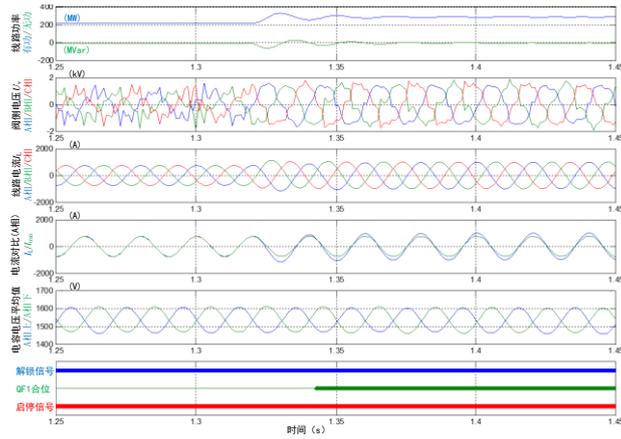
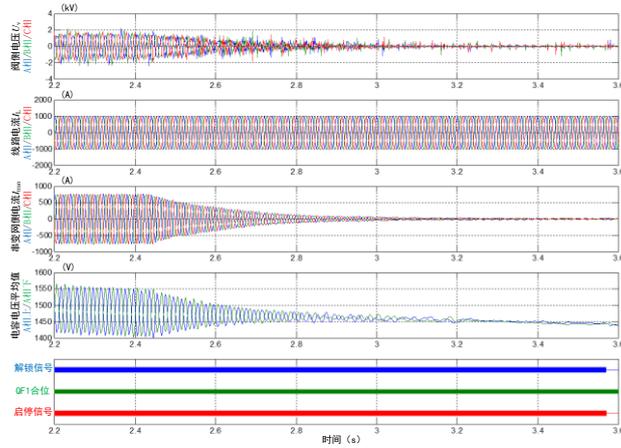


图 A3 SSSC 稳态运行波形图

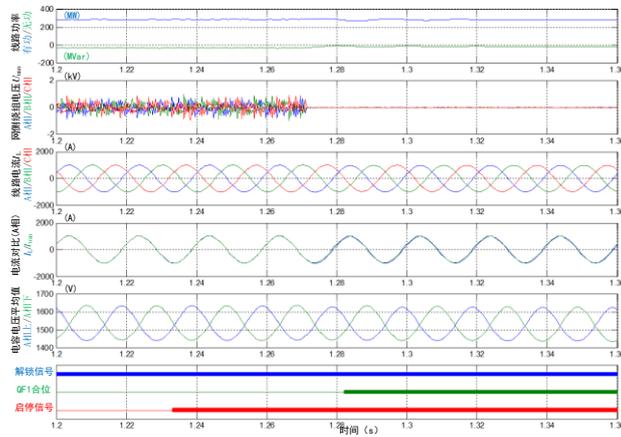
Fig.A3 Waveforms under steady operation of SSSC



(a) 实际工程中零电压合网侧旁路开关 (U_V 控制)



(b) 零电流闭锁换流器



(c) 零电压合网侧旁路开关仿真结果 (U_{tran} 控制)

图 A4 SSSC 停运过程波形图

Fig.A4 Waveforms in shutdown process of SSSC