

静止同步串联补偿器的电磁暂态特性分析

罗承廉¹, 刘昊², 汤广福³, 刘遵义²

(1. 河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 2. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100085)

摘要: 结合 500 kvar/10 kV 静止同步串联补偿器样机的研制, 介绍了主电路构成方案, 阐述了其工作原理。利用 PSCAD/EMTDC 建立了电磁暂态仿真模型, 以样机实际运行环境为背景, 校验了低通滤波器、耦合变压器和直流电容等设备的参数设计的合理性, 研究了样机在启动时模式切换中出现的暂态现象, 验证了内层控制中的直流电压调整和虚拟母线电压调节的能力。仿真试验表明, 选取的设备参数正确, 采用的控制策略合理, 能够达到样机的控制目的。

关键词: 静止同步串联补偿器; 电磁暂态特性; PSCAD/EMTDC; 链式换流器; 建模

Analysis on electromagnetic transient characteristic of static synchronous series compensator

LUO Cheng-lian¹, LIU Hao², TANG Guang-fu³, LIU Zun-yi²

(1. Henan Electric Power Corporation, Zhengzhou 450052, China; 2. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: This paper introduces the main structure of 500kVar/10kV static synchronous series compensator model machine. Based on PSCAD/EMTDC, the electromagnetic simulation model is proposed. Taking practical environment of the model machine as background, it approves the rationality of parameter design for equipments such as low-pass filter, coupling transformer, DC capacitor and so on. The transient phenomenon during operational pattern switch is analyzed. The capability of DC voltage regulation and dummy bus voltage regulation is validated in this paper. These studies provide theories for the development of model machine.

Key words: static synchronous series compensator; electromechanical transient performance; PSCAD/EMTDC; Chain circuit converters; modeling

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)12-0041-06

0 引言

静止同步串联补偿器 SSSC (Static Synchronous Series Compensator) 是一种新型的串联补偿装置, 和其它 FACTS 装置相比, 它可以直接控制系统中电压幅值、相角等状态变量, 具有控制范围广、响应速度快等优点。同时, 新一代 FACTS 装置的技术核心是可关断器件组成的电压源型逆变器, 对基于此种结构的 SSSC 技术的研究具有技术的先导性和辐射性。因此, 国家电网公司将 SSSC 作为重大科技项目列入“十一五”科技规划, 委托河南省电力公司对 SSSC 关键技术开展研究工作。

上世纪九十年代以来, SSSC 开始受到国内外专家的关注^[1~9]。L.Gyugyi 对 SSSC 的稳态特性进行了分析, 探讨了 SSSC 的基本运行特性, 并在性能上与 TCSC 进行比较^[1]。文献[2]分析了常规及混合式串联补偿, 探讨了它们对静态、暂态稳定性的改善以及故障功角振荡的阻尼, 并提出了 3 个单相

电压源的等效 SSSC 模型。文献[3]提出了 24 脉冲多重变压器结构的 SSSC 模型, 基于等值电抗的参考值产生 SSSC 的控制信号。文献[4]和[5]分别利用神经网络控制和模糊自整定控制设计了 SSSC 潮流控制器。将 SSSC 视为受控电压源, 文献[6]推导了 SSSC 的动态数学模型, 并运用 Matlab 仿真工具建立了 SSSC 的仿真模型。

目前, SSSC 的研究集中于数学模型的建立、控制机理的探讨上, 对 SSSC 的工程应用研究环节论述较少。而其中电磁暂态研究既是理论分析的重点, 同时也是工程应用研究的起点, 它涉及到 SSSC 拓扑结构、触发方式、器件选择与配合等方面。本文将结合 500 kvar/10 kV SSSC 工业样机的研制, 对此部分的研究工作进行详细论述。

1 SSSC 工业样机的主电路

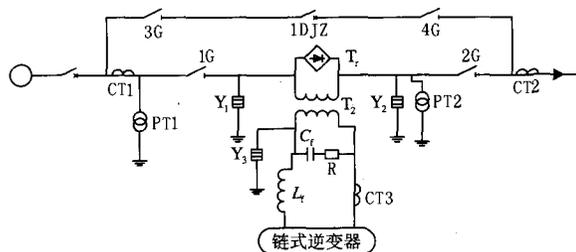


图 1 SSSC 工业样机主接线示意图

Fig.1 Main connection of SSSC industrial model machine

500 kvar/10 kV SSSC 工业样机的主电路接线如图 1 所示。图中：1DJZ 为 SSSC 装置的旁路断路器，正常时用于投入和退出 SSSC 装置，线路故障时闭合，以保护 SSSC 装置； T_r 为反并联晶闸管，可迅速导通对 SSSC 装置起旁路保护作用，以防止线路故障时在耦合变压器的换流器侧产生高电压和短路电流； Y_1 、 Y_2 、 Y_3 为金属氧化物避雷器，防止各种原因产生的高电压对装置的破坏； T_2 为耦合变压器，将 SSSC 中链式逆变器的输出耦合在线路上； L_f 、 C_f 、 R 构成低通滤波器，滤除换流器所产生的高次谐波。

SSSC 工业样机中逆变器主电路采用链式结构，每相有三个单相 H 桥换流器链接构成，可以实现分相控制。相对于飞跨电容式和二极管箝位式多电平结构，它省去了大量的飞跨电容和箝位二极管，在输出相同电平数的情况下，结构最为简单。相对于多重化结构，采取链式结构可省去曲折变压器，降低了系统成本。

2 电磁暂态仿真环境

2.1 系统等值

SSSC 工业样机将安装于濮阳岳村变电站岳西线，最大负荷（按配变容量之和）为 3650 kVA，求得最大电流：

$$I_{\max} = 3650 / (10.5 \times 1.732) = 200.7 \text{ A}$$

为了便于分析，可将 10 kV 以上系统用一简化网络来等值。简化等值网络为一中性点不接地的三相电源、正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗。正序阻抗可根据短路容量按下式求得：

$$Z_+ = \frac{U^2}{S_d}$$

按最大短路容量 $S_d = 290 \text{ MVA}$ ，求得 $Z_+ = 0.38 \Omega$ 。为了反映系统损耗，阻抗角设定为 89° 。根据经验，负序阻抗与正序阻抗相同，而零序阻抗参数可由下式来求取：

$$Z_0 = 2Z_+ = 0.76 \Omega$$

为了验证简化等值网络的适用性，在 10 kV 母线进行三相短路仿真试验，A、B、C 三相短路电流如图 2 所示。稳态短路电流为 16.082 kA，瞬时冲击电流可达 43.528 kA，为稳态短路电流的 2.7 倍。根据仿真所得数据，算得 10 kV 母线短路容量为 292 MVA，与实际系统最大运行方式下短路容量基本一致。

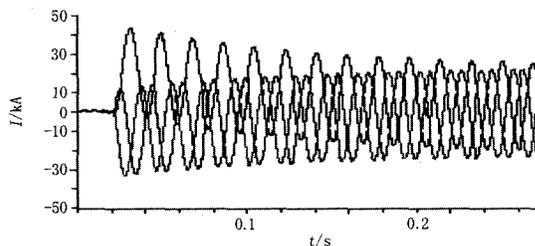


图 2 10 kV 母线三相短路接地时短路电流波形图

Fig. 2 Current wave when three phase grounded fault occurred

2.2 变压器模型

考虑到逆变器的谐波分量，以及样机运行模式切换所带来的暂态过程，电磁暂态分析需要建立准确的变压器模型。其中描述磁化曲线是变压器模型仿真过程中的关键问题，磁化曲线模型建立的准确性直接关系到变压器模型的可行性和准确性。为了保证变压器铁芯不饱和，必须给耦合变压器的铁芯增加气隙，而这往往会导致损耗增大。只能采用折中的方法，在保证耦合变压器的铁芯不饱和及电抗值适中的情况下，尽量减小气隙尺寸以提高耦合变压器传输效率。结合变压器厂家的生产能力，采用 MTDC 中 UMEC 详细模型，选取了相应的磁化曲线，直接计及了铁芯磁饱和效应（如图 3 所示）。所选变压器容量 200 kVA，额定电压 1000 V，变比 1:1，空载损耗 652 W，短路损耗 4010 W，空载电流按 2% 来选取，漏抗为 3.32%。

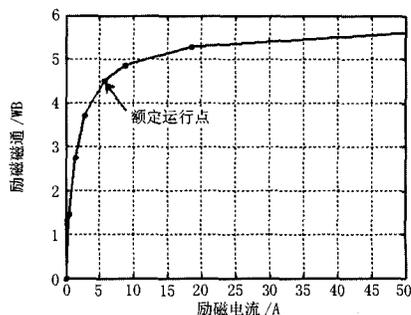


图 3 变压器基本磁化曲线

Fig.3 Basic magnetization curve of transformer

2.3 滤波器模型

由于链节数目少, 即使采用载波移相的调制方法, 逆变器的输出仍含有较大的谐波成分。仿真条件: 逆变器直流侧电压为 600 V; 三角载波频率为 500 Hz, 调制比为 0.8。从仿真结果可以看出, 输出电压的基波有效值为 1027 V, 输出电压的 THD 为 24.16%, 谐波集中于 3 kHz 附近。

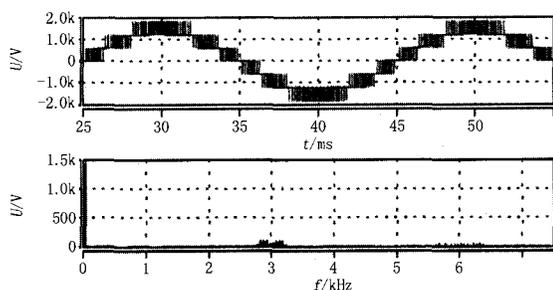


图 4 A 相输出电压的波形及频谱

Fig.4 Wave and spectrum of voltage output

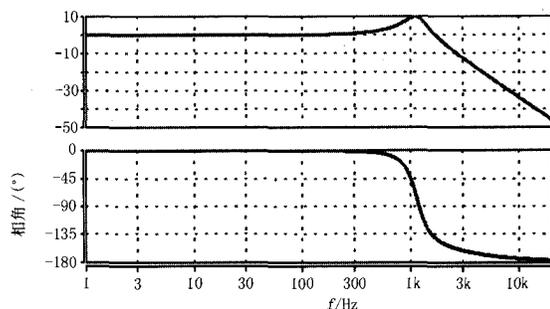


图 5 电压传递的频谱特性图

Fig.5 Spectrum characteristic of voltage transmission

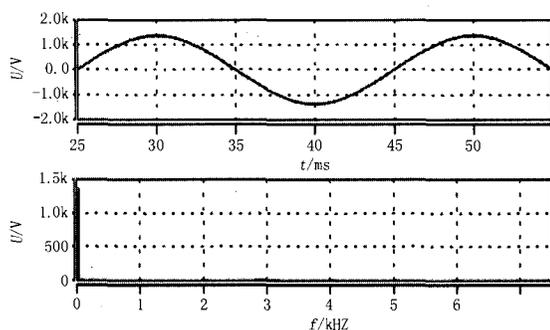


图 6 滤波后输出电压波形及频谱

Fig.6 Voltage wave and spectrum after filter

滤波器的设计需要综合考虑基波压降、有功损耗、电流谐波和谐振等因素。其中: 电感作用是抑制变频器产生的高次谐波通过; 电容为变频器产生的高次谐波提供旁路; 而电阻则起阻尼作用, 防止

发生谐振。通过分析, 我们得到滤波器参数 $L_f = 1.5 \text{ mh}$, $C = 23.5 \mu\text{F}$, $R = 3.3 \Omega$, 其电压传递的频谱特性如图 5 所示。可以发现, 滤波器对基波电压几乎无影响, 而对高频有很大的抑制作用。

加装滤波器后, 在相同条件下进行仿真, 输出电压的基波有效值为 964 V, 与未加装滤波器相比有所下降, 其原因是线路电流通过变压器的漏抗而产生压降, 而 THD 值降低为 1.29%, 如图 6。

2.4 直流侧电容参数确定

在样机稳态运行时, 线路电流为 $I_1 = \sqrt{2}I \sin \omega t$, SSSC 仅仅与线路交换无功, 单个逆变器桥的输出电压为: $U_c = \pm \sqrt{2}U \cos \omega t$, 所以在不计及损耗的情况下, 单个直流电容与外部的能量交换为:

$$E = \frac{1}{2}CU_d^2(t_1) - \frac{1}{2}CU_d^2(t_2) =$$

$$\int_{t_1}^{t_2} (\pm \sqrt{2}I \sin \omega t \times \sqrt{2}U \cos \omega t) dt =$$

$$\pm \frac{UI \cos 2\omega t_1 - UI \cos 2\omega t_2}{2\omega}$$

则可以得到:

$$\Delta U_d = U_d(t_1) - U_d(t_2) = \pm \frac{UI \cos 2\omega t_1 - UI \cos 2\omega t_2}{\omega C (U_d(t_1) + U_d(t_2))}$$

从上式可以看出, 稳态时直流电压值的变化量含有 2 次谐波成分, 其波动的幅值与电容值成反比, 与补偿电压、线路电流成正比。并且, 在一个工频周期内即: $t_2 - t_1 = \frac{2\pi}{\omega}$ 时, $\Delta U_d = 0$ 。也就是说, 直流电容与外部能量交换为零, 其电压值不变。

为了获得良好的运行效果, 并且避免逆变器发生故障, 需要将直流电压的波动限制在一定的范围内。一方面需要增加直流电压的闭环 PI 控制环节, 另一方面需要合理地选择直流电容值。上式可以提供一定的参考, 但还需计及样机的非稳态运行环境。

在线路发生故障的情况下, 为了防止过电流和过电压对 SSSC 的冲击, 旁路电路迅速将装置旁路, 所以直流电压的波动无需考虑线路的故障情况。以下分析样机在负荷突变时, 直流侧电容电压的变化情况。建立如下仿真环境: 1) 线路电流有效值是 200 A; 2) 逆变器输出电压的有效值为 1000 V。此时对电容电压的调整, 不能通过增加逆变器的输出来实现, 而只能通过逆变器的输出电压的相角调整; 3)

负载变化引起线路电流的相角突变, 突变角设定为 30° ; 4) 同步跟踪电路在一个周波时才准确地跟踪到线路电流的相位。

采用不同的直流侧电容的容量值, 在直流电压初始值均为 550 V 的条件下, 采用相同的直流电压闭环 PI 控制, 电容电压调节曲线如图 7 所示。可以看出电容值较大时, 直流电压的波动较小。结合逆变器的结构设计、样机造价等因素, 最终确定直流侧电容的容量值为 27 mF 。

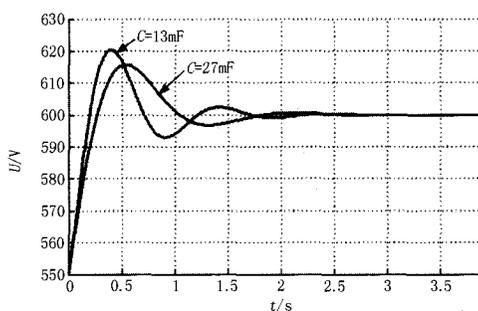


图 7 扰动下直流电压示意图

Fig.7 Direct voltage wave under perturbations disturbance

3 工业样机的运行特性

SSSC 是多变量控制系统, 并且状态变量之间往往相互影响。将 SSSC 的多种控制功能 (包括潮流、电压、稳定性等), 按照多变量控制器的设计方法, 统一设计成一个控制器, 可有效地解决多目标控制的协调问题。从结构上, 控制器可以分为两层: 外层对系统运行状态进行调节; 内层相应外层设置的参考值, 结合装置的运行状态, 向逆变器电路发出动态的控制信号。由于样机试运行线路容量小、电压等级低等情况限制, 难以验证样机改善系统暂态特性、阻尼低频振荡等功能, 电磁暂态分析就以内层控制中直流电压调整和虚拟母线电压调节两个环节为重点分析对象。

SSSC 装置在稳态和扰动后均要保持直流电压的恒定, 意味着调节与线路之间存在有功的交换, 只能通过控制输出电压的相角偏移量来实现。控制模式为分相控制, 采用闭环 PI 调节, 输入变量为直流电压的当前值。为了消除直流侧电压固有 2 次谐波的影响, 需要对当前值进行二阶低通滤波, 传递函数为:

$$F(S) = \frac{1}{1 + 2\xi S/\omega_n + (S/\omega_n)^2}$$

其中: $\xi = 0.707$, $\omega_n = 2\pi \times 10\text{ rad/s}$ 。

稳态运行时, SSSC 输出电压垂直于线路电流, 调节受控点电压可以通过调节逆变器的调制比来实现。为了获得良好的控制效果, 采用了闭环 PI 控制, 输入变量为虚拟母线处电压。

3.1 样机的启动过程

样机的启动方式可以采用“它励”和“自励”。如果采用“它励”方式, 需要增加一个并联支路, 利用移相整流变压器和整流电路, 采取适当的控制达到软启动, 无疑将增加样机的成本, 加大系统的控制复杂性。实际上, 无需增加任何附属电路, SSSC 就可以通过串联侧从系统中汲取能量, 从而建立直流电压。

SSSC 投入前, 旁路断路器 1DJZ 闭合, 样机处于旁路状态, 直流电压调整和虚拟母线电压调节控制处于闭锁状态, 设定相应的输出初值偏移角 $\alpha = 0$ 、调制比 $M = 0.7$ 。2 s 时刻, 打开旁路断路器, 同时直流电压调整环节解锁, 由于直流电容电压值为 0, 所以此时逆变器输出电压为 0。随后, 由于直流电压调整环节作用, 偏移角 α 不断调整, 直流电容逐渐建立电压, 逆变器仍然按照设定的调制比输出电压, 直至直流电压达到设定范围, SSSC 进入稳态调节。此过程的仿真结果如图 8~图 14 所示。

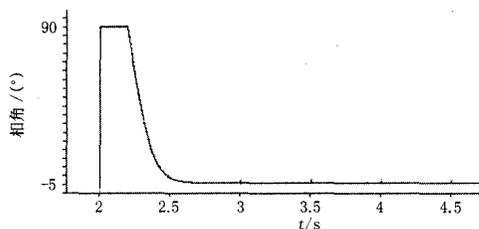


图 8 启动过程中相角偏移量

Fig.8 Phase angle offset during start-up process

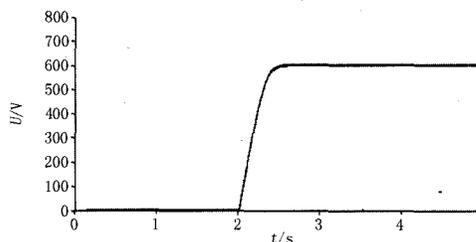


图 9 直流电压充电过程

Fig.9 Direct voltage charging process

从图 9 可以看出, 样机的充电过程不到 1 秒钟, 稳态运行时, 偏移角为 2° 左右 (图 8), 仍然从线路汲取能量, 目的是补偿逆变器的各种损耗。在旁路断路器开断过程中, 线路电流有轻微波动 (图

10)。而在此过程中, 由于负载电流顺速向耦合变压器转移, 导致耦合变压器线路侧出现暂态过电压(图 11)。由于 C 相转移电流较最大, 相应暂态过电压最大, 最高电压达 1267 V, 持续时间小于 1 ms。此高电压会经耦合变压器传递到二次侧滤波电容两端, 滤波电感也会相应地承受这个瞬时高压(图 12)。

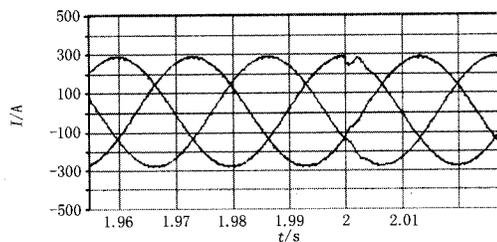


图 10 启动过程中线路电流波形图
Fig.10 Current wave during start-up process

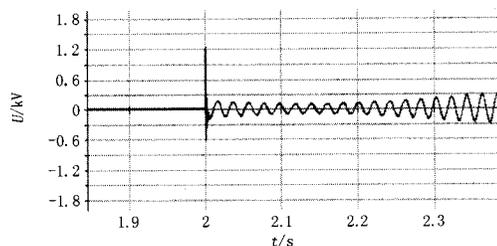


图 11 启动过程中耦合变压器线路侧电压波形图
Fig.11 Voltage wave on the line side

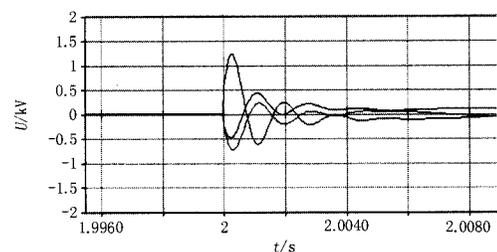


图 12 启动过程中电容电压波形图
Fig.12 Capacitor voltage wave during start-up process

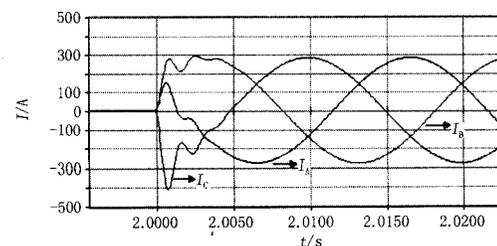


图 13 启动过程中逆变器输出电流波形图
Fig.13 Current wave of the output of inverter

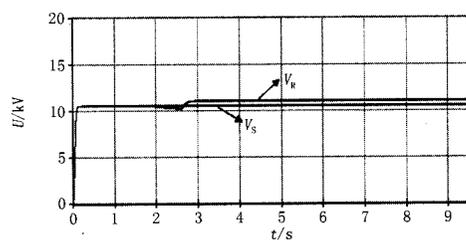


图 14 启动过程中线路电压波形图
Fig.14 Circuit voltage wave figure during start-up process

由于采用了零电压启动, 耦合变压器不会产生励磁涌流, 仿真结果也印证了这一点。但根据上面的分析, 启动过程中耦合变压器的逆变器侧会有瞬时高电压, 将会导致滤波电感和 H 逆变桥中出现超过 400 A 的瞬时电流(图 13)。

从图 14 可看出, 启动过程中, 由于偏移角 α 的调整, SSSC 出口虚拟母线电压会暂时降低约 300 V, 持续时间小于 1 s, 属于允许范围内波动。稳态时调制比设定为 0.7857, 逆变器输出电压基波有效值 1000 V, 经过滤波电感和耦合变压器漏感的损耗, SSSC 注入线路电压为 900 V, 电压滞后线路电流 88.58° 。经 SSSC 补偿后, SSSC 出口电压逐渐升高并维持在 10.98 kV。

3.2 样机的注入电压在线调节

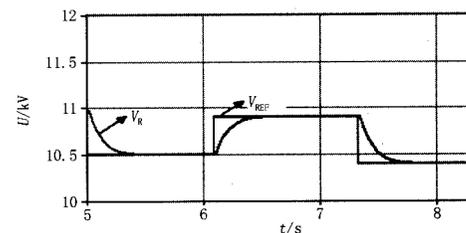


图 15 设定电压跟踪示意图
Fig.15 General view of setted voltage tracing

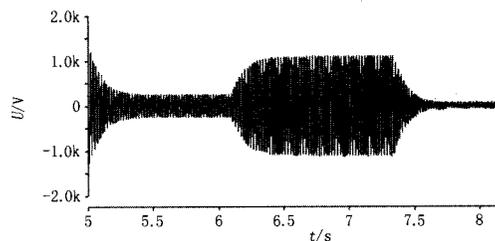


图 16 SSSC 补偿电压示意图
Fig.16 Voltage compensation of SSSC

系统达到稳态后, PI 控制器解锁。在线调节 SSSC 出口处虚拟母线电压设定值, PI 控制器调整

逆变器的调制比,控制 SSSC 注入线路的电压,从而控制 SSSC 出口虚拟母线电压。为运行安全可靠,调制比不能设定太高;为保证在各种运行环境下,逆变器直流侧能够从线路汲取足够能量以补偿损耗,调制比不能设定太低。因此,将调制比调节范围限定为 0.1~0.8 之间。从图 15、图 16 仿真结果可以看出,样机能够快速、准确地响应电压调节指令。

4 小结

针对 500 kvar/10 kV SSSC 工业样机的研制,本文利用 EMTDC 进行了电磁暂态研究:

1) 分析低通滤波器的特性和 SSSC 的抗扰能力,为滤波电感、滤波电容、直流电容等设备的选型和参数的确定提供了依据;

2) 验证直流电压调整和虚拟母线电压调节能力,确定内层控制策略。目前,样机研制顺利,已进入组装和实验阶段。

参考文献

- [1] Gyugyi L, Dscjaider C, Ksen K. Static Synchronous Series Compensator: a Solid-state Approach to the Series Compensation of Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1):406-417.
- [2] Sen K K, SSSC-static Synchronous Series Compensation: Theory, Modeling And application[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(1):241-246.
- [3] Harley H R. A Static Synchronous Series Compensator Model for EMTDC[A]. In: Africon Conference in Africa, 2002. IEEE AFRICON. 6th[C]. 2002. 933-939.
- [4] 杨琪, 王辉. 基于神经网络控制算法的 SSSC 潮流控制器设计[J]. 电机电器技术, 2005, (5):17-20.
YANG Qi, WANG Hui. SSSC Power Flow Control Based on Artificial Function Neural Network[J]. Technology of Electric Motor And Appliance, 2005, (5):17-20.
- [5] 王辉, 王耀南, 许维东. 基于模糊自整定 PI 控制的 SSSC 潮流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7):65-69.
WANG Hui, WANG Yao-nan, XU Wei-dong. Investigation of a Power Flow Controller of SSSC Based on Self-Tuning PI Controller with Fuzzy Logic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7):65-69.
- [6] 颜伟, 吴文胜, 华智明, 等. SSSC 非线性控制的直接反馈线性化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3):65-68.
YAN Wei, WU Wen-sheng, HUA Zhi-ming, et al. Direct Feedback Linearization Method For Designing SSSC Nonlinear Control Law[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3):65-68.
- [7] 赵建军, 郭剑波, 周孝信. 静止同步串联补偿器变参数非线性暂态稳定控制器的设计[J]. 电网技术, 2005, 29(21):14-20.
ZHAO Jian-jun, GUO Jian-bo, ZHOU Xiao-xin. Design of Transient Stability Controller of Static Synchronous Series Compensator Based on Variable Parameters Nonlinear Control[J]. Power System Technology, 2005, 29(21):14-20.
- [8] 王超, 舒乃秋, 吕小静. 基于非线性控制理论的 SSSC 控制器的研究[J]. 中国电力, 2004, 37(4):36-38.
WANG Chao, SHU Nai-qiu, Lü Xiao-jing. Study on SSSC Controller Based on Nonlinear Control Theory[J]. Electric Power, 2004, 37(4):36-38.
- [9] 王庆红, 胡国根. 一种基于 48 脉冲电压源逆变器的静止同步串联补偿器的设计与建模[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5):61-66.
WANG Qing-hong, HU Guo-gen. Modeling and Control Design of a 48-Step Inverter Based Static Synchronous Series Compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5):61-66.

收稿日期: 2006-10-31; 修回日期: 2007-04-09

作者简介:

罗承廉(1945-), 男, 教授级高工, 从事电力系统自动化、继电保护和电力电子新技术领域的研究工作;

刘昊(1979-), 男, 博士, 从事电力电子技术的研究;

E-mail: liuhao8462@163.com

汤广福(1966-), 男, 博士, 主要从事 FACTS 和 HVDC 技术的研究。

“科技创新年”许继获表彰

2007 年 5 月 24 日上午, 在许昌市“科技创新年”活动表彰会上, 许继集团公司研制开发的“DPS-2000 直流输电控制保护系统”被认定为许昌市职工优秀技术创新成果。许继电气副总经理姚致清作为“职工优秀技术创新成果第一完成人”, 荣获许昌市“五一劳动奖章”。许继电源有限公司总经理张东江、许继电梯公司刘成辉二人荣膺“许昌市技术创新能手”称号。