

含有限流式静止同步串联补偿器的直流配电网

杜翼¹, 朱克平², 江道灼¹, 王玉芬¹, 尹瑞¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 国网浙江省电力公司电力经济技术研究院, 浙江 杭州 310003)

摘要: 将固态限流器(FCL)与静止同步串联补偿器(SSSC)连接, 构成限流式静止同步串联补偿器(SSSC-FCL)。将SSSC-FCL连入直流配电网后, 能够改善配电网的电能质量, 提高配电网的稳定性。提出了含有SSSC-FCL的双层环状直流配电网拓扑结构, 利用PSCAD/EMTDC对提出的拓扑结构进行建模, 对直流配电网的正常工况和故障情况进行了仿真。仿真结果表明:SSSC-FCL能够对线路的潮流进行调节; 当系统发生故障时, FCL模块能够有效限制短路冲击电流, 同时保障非故障线路正常运行, 提高了直流配电网的稳定性。

关键词: 配电网; 分布式发电; 限流式静止同步串联补偿器; 拓扑; 仿真; 建模

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.019

0 引言

现有城市配电网由交流形式提供电能, 交流配电网的主要优势为电压变化方便、线路保护方面的研究相对成熟, 但也存在供电容量不足、输电走廊紧张、电能质量较差、分布式电源难以接入等问题。文献[1-3]的研究表明, 在未来的电力系统中, 分布式能源和以电动汽车充电站为代表的直流负荷将大量接入城市配电网。假如将分布式能源和直流负荷直接接入现有的交流配电网, 需要大量换流器和储能设备, 经济性和可靠性较差。城市直流配电网利用柔性直流输电的优势, 既能解决现有城市配电网中的不足, 也能迎接未来城市配电网的挑战。目前国内外对直流配电网的相关研究主要集中在直流配电网与交流配电网的优缺点比较、直流配电网的关键技术、直流配电网的保护措施[4-6]等方面, 对直流配电网拓扑结构的建模仿真研究仍处在初步阶段。

文献[7-9]的研究成果表明静止同步串联补偿器SSSC(Static Synchronous Series Compensator)不仅可以提高输电线路的传输能力, 还可以改变线路有功功率的流向, 从而改善潮流和电压的可控性, 提高电力系统的稳定性。但上述文献并未研究系统故障时SSSC装置的过流保护问题。

本文将固态限流器(FCL)与SSSC通过串联变压器相连接, 构成限流式SSSC(SSSC-FCL), 使其能在故障情况下很好地限制短路电流; 将限流式SSSC接入直流配电网中, 在准确调节线路潮流的同时, 有效改善了配电网的电能质量和稳定性; 最后, 在PSCAD/EMTDC平台中构建了含有限流式SSSC的双层环状直流配电网, 并进行数字仿真研究。

1 直流配电网

1.1 直流配电网的优点

与交流配电网的功能相同, 直流配电网在电力系

统网络中同样起着分配电能、为城市供电负荷提供电能的作用。直流配电网具有如下特点: 在绝缘水平相同的情况下, 直流配电网的传输功率约为交流配电网的1.5倍[6,10]; 直流配电网能够方便地接入各种分布式电源和电动汽车充电站; 不同于交流配电网, 直流配电网并不存在涡流损耗以及线路的无功损耗, 直流配电网的损耗仅为交流网络的15%~50%[6,11]; 理论上直流系统没有频率偏差、三相电压不平衡和无功补偿等问题, 因此能够有效避免电压波动与闪变、频率偏移、谐波污染等问题, 能够有效地改善电能质量, 提高电网可靠性[12-13]。

1.2 直流配电网的拓扑结构

目前国内外对直流配电网的研究处于起步阶段, 尚未形成系统的直流配电网结构[14-15]。类似于交流配电网, 直流配电网常见的拓扑结构有链式直流配电系统、两端直流配电系统和环状直流配电系统, 如图1所示。

链式直流配电系统结构相对简单, 成本较低, 其供电可靠性相对两端、环状直流配电系统较低, 但发生故障时, 其故障识别及保护控制配合等相对容易; 两端直流配电系统和环状直流配电系统由于包含直流母线, 所以其供电可靠性相对较高, 但故障识别及保护控制配合等也相对困难。在实际的直流配电网中, 可以根据当地的实际情况(包括可靠性要求等)选取不同的拓扑结构。

1.3 本文构建的直流配电网拓扑结构

由于城市规划的选择, 本文构建的城市直流配电网包含2个电压等级; 城市内部由于空间紧张且主要为家用负荷, 功率流动较低, 选取低电压等级; 城市外围有富余的空间且包含工业负荷, 功率流动较大, 因此选择较高的电压等级。综合考虑各种分布式能源、电动汽车充电站为代表的储能装置的传输功率、占地面积和仿真模型建立的难易程度, 本文

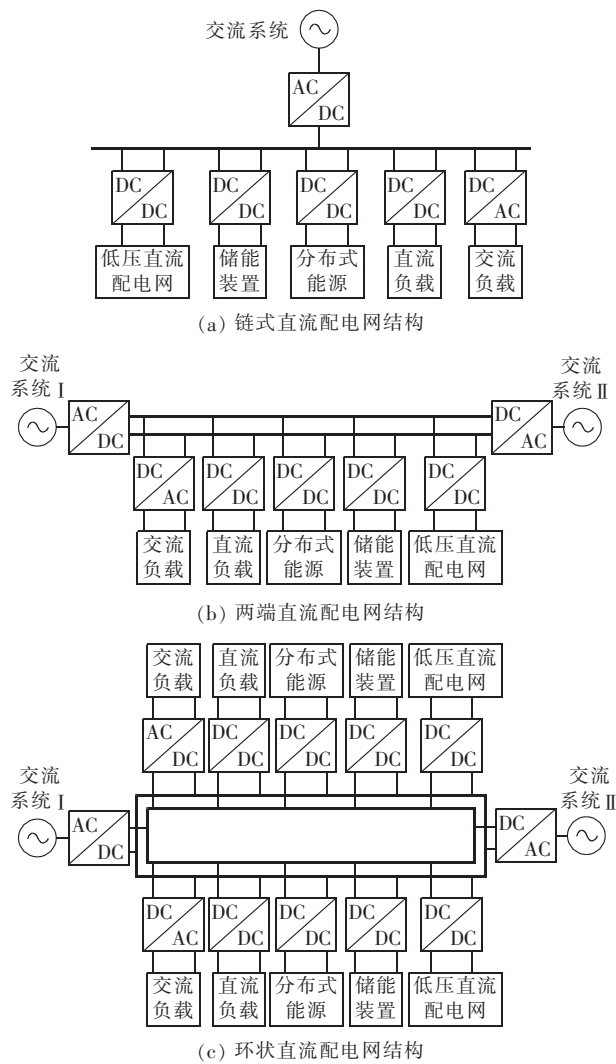


图 1 直流配电网的常见拓扑结构

Fig.1 Common topological structures of DC distribution network

选取 1 kV 和 10 kV 这 2 个电压等级。

由于直流配电网目前仍处于研究阶段,初期会涉及的用户主要为对电能质量要求相对较高的用户,如芯片制造厂商等。因此,本文提出的直流配电网拓扑结构是在环状直流配电网拓扑的基础上构建而

成。图 2 为本文提出的含有限流式 SSSC 的双层环状直流配电网拓扑结构。

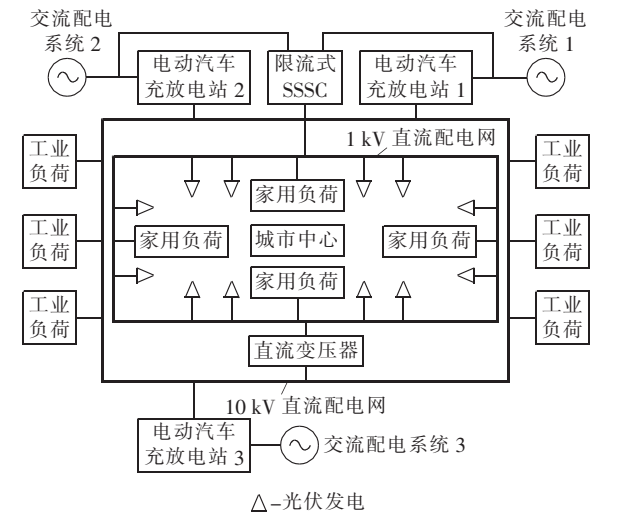


图 2 含有限流式 SSSC 的直流配电网结构
Fig.2 DC distribution network with SSSC-FCL

2 限流式 SSSC 介绍

2.1 限流式 SSSC 拓扑结构

本文将固态限流器与 SSSC 通过串联变压器相连接。在正常工作情况下,限流器模块不会对系统运行产生影响,该装置等同于 SSSC 单独运行;当系统发生短路故障时,限流电感快速切入变压器副边,相当于在变压器原边即线路中插入一个限流电感,从而能够限制短路电流。限流式 SSSC 的拓扑结构如图 3 所示。

2.2 限流式 SSSC 的工作原理^[16]

限流式 SSSC 正常运行时,限流器模块中的晶闸管 $V_{T1}—V_{T8}$ 的触发脉冲始终为开通状态。经过短暂的启动过程进入稳态后,由于续流管的导通,三相桥式电路的直流侧被短接,整个限流器模块呈现零阻抗,系统等效为 SSSC 进行潮流调节。

当安装点附近发生短路时,系统电压将会加在串联变压器的原边绕组并耦合到副边绕组,此时,限流

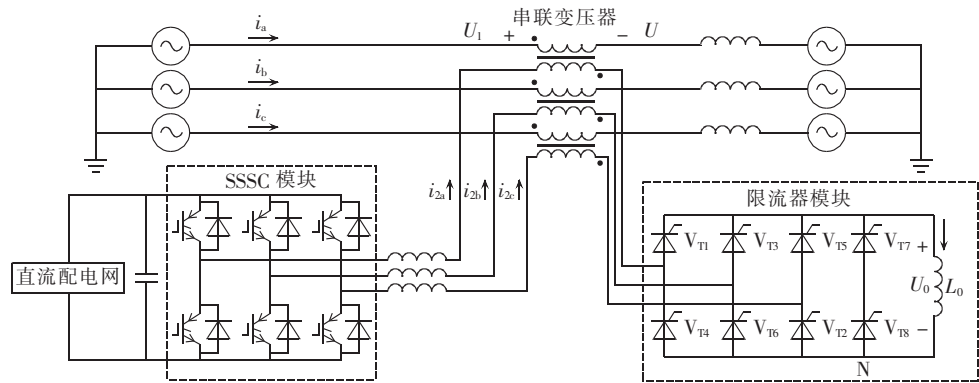


图 3 限流式 SSSC 拓扑结构
Fig.3 Topological structure of SSSC-FCL

$$\begin{aligned} P_{pv} &= U_t I \\ I &= I_{sc} \{ 1 - K_1 \{ \exp [(U_t - \Delta U_t) / (K_2 U_{oc})] - 1 \} \} \\ \Delta U_t &= -\beta \Delta T - R_s \Delta I \\ \Delta I &= \alpha (S / S_{ref}) \Delta T + (S / S_{ref} - 1) I_{sc} \\ \Delta T &= T - T_{ref} \\ K_1 &= (U_M / U_{oc} - 1) [\ln (1 - I_M / I_{sc})]^{-1} \\ K_2 &= (1 - I_M / I_{sc}) \exp [-U_M / (K_1 U_{oc})] \end{aligned}$$

其中, P_{pv} 为输出功率; U_{oc} 为开路电压; I_{sc} 为短路电流; K_1 、 K_2 为常数; ΔT 、 ΔI 、 ΔU_t 为光伏电池温度、电流、电压的增量; U_M 和 I_M 分别为最大功率电压、电流; S_{ref} 和 T_{ref} 分别为参考光照强度和参考光伏电池温度, 分别通常取 1 kW/m^2 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$; 参数 α 和 β 分别为参考光照强度下的电流和电压温度系数。

光伏电池输出的短路电流与开路电压受环境温度的影响, 为使工作点始终处于输出功率最大点, 采用最大功率点跟踪 (MPPT) 策略中的导纳增量法, 利用 PSCAD 建立仿真模型, 设置环境参数的变化如图 7 所示, 光伏发电输出功率如图 8 所示。

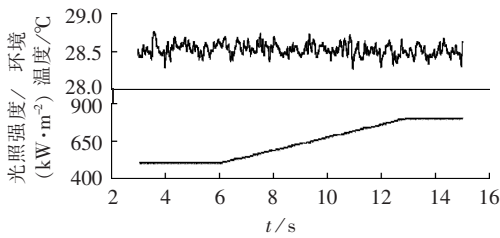


图 7 环境参数的变化

Fig.7 Variation of environmental parameters

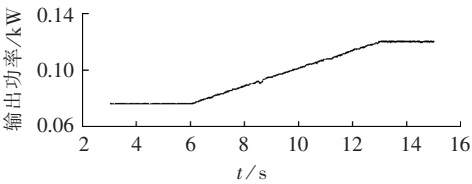


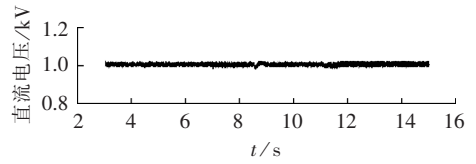
图 8 光伏发电的输出功率

Fig.8 Power output of PV

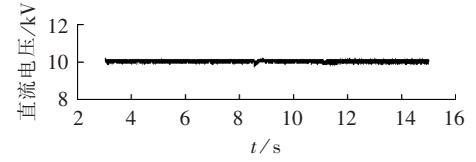
对参数进行设置: 家用直流负荷需求 50 kW , 工业直流负荷需求 2.5 MW ; 电动汽车充电站 1 的起始功率为 2500 kW , 在 8.5 s 时对其充电至 3500 kW ; 电动汽车充电站 2 和电动汽车充电站 3 的功率分别为 3250 kW 和 1000 kW 。整个直流配电网电气量的变化如图 9 所示。

由图 9 可知: 随着环境参数的改变, 光伏发电有较大的变化; 但是在此过程中, 整个直流配电网电压稳定在 10 kV 和 1 kV , 电压波动小于 2% ; 民用负荷、工业负荷和 3 个电动汽车充电站所用功率都与设定值相同, 波动小于 2% , 不受环境变化的影响。

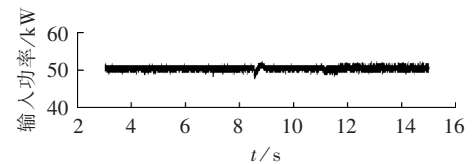
直流配电网还通过限流式 SSSC 模块与交流配电系统相连接。设置系统在 $7 \sim 13 \text{ s}$ 内, 交流配电系统 1 向交流配电系统 2 传递的有功功率为 5 MW ; 在



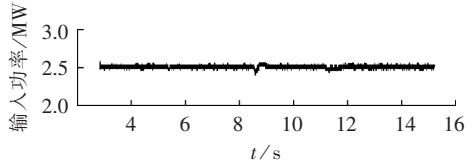
(a) 1 kV 直流配电网电压



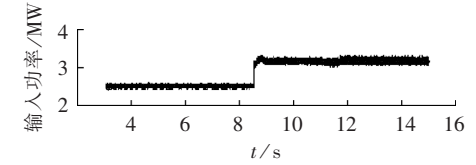
(b) 10 kV 直流配电网电压



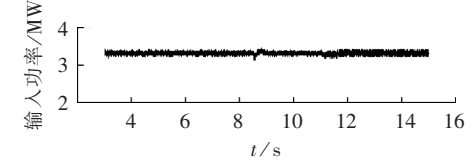
(c) 家用直流负荷功率



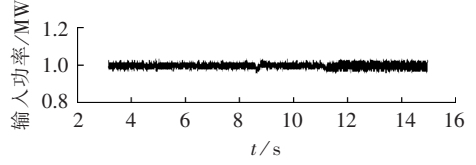
(d) 工业直流负荷功率



(e) 电动汽车充电站 1 功率



(f) 电动汽车充电站 2 功率



(g) 电动汽车充电站 3 功率

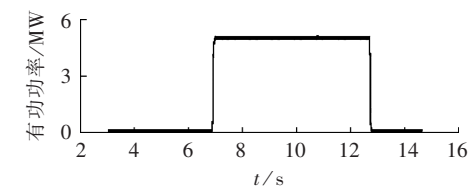
图 9 直流配电网中电气量的变化

Fig.9 Variation of electrical variables in DC distribution network

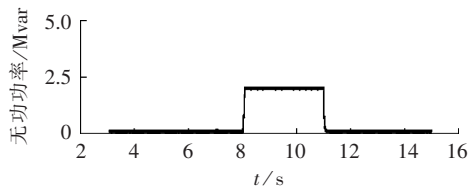
$8 \sim 11 \text{ s}$ 内交流配电系统 1 的无功需求为 2 Mvar 。对系统进行仿真, 结果如图 10 所示。由图可见, 城市直流配电网能够按照系统的要求通过 SSSC 调节交流线路的潮流。

3.3 故障情况分析

当交流线路上发生三相短路故障时, 假设故障发生在 SSSC 与交流线路的连接处, 此时电压全部加在串联变压器两端, 即为最严重的短路情况。根据控



(a) 交流线路上的有功功率流动



(b) 交流线路上的无功功率流动

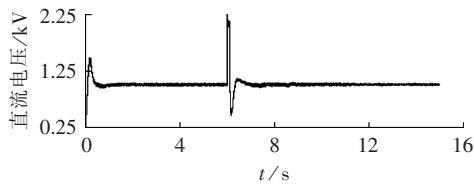
图 10 交流配电网中电气量的变化

Fig.10 Variation of electrical variables in AC distribution network

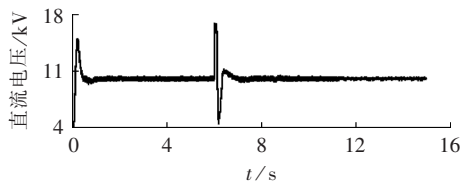
制策略,当检测到故障后,封锁 SSSC 模块的触发脉冲,隔离故障区域,在仿真中设置故障发生在 6 s,故障发生 0.1 s 后切除故障线路。

3.3.1 系统中不含限流器模块时发生短路故障

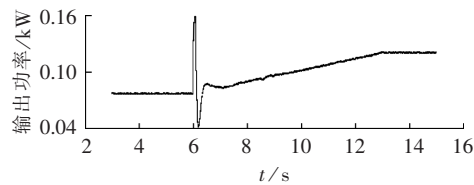
假设系统中不含限流器模块,此时发生上述最严重短路故障,非故障区域即直流线配电网的电气变化量如图 11 所示。



(a) 1 kV 直流配电网电压



(b) 10 kV 直流配电网电压



(c) 光伏发电的输出功率

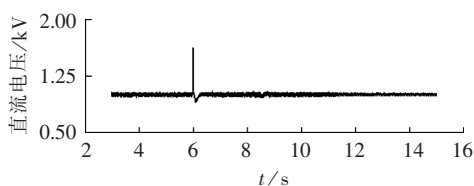
图 11 不含固态限流器的直流配电网发生故障时电气量的变化

Fig.11 Variation of electrical variables during fault of DC distribution network without FCL

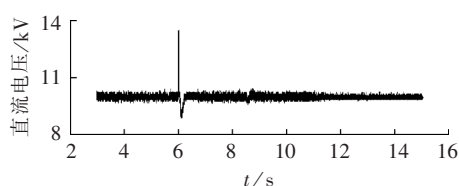
3.3.2 系统中含有限流器模块时发生短路故障

当系统中含有限流器模块时,直流配电网各电气量的变化如图 12 所示,交流线路上电气量的变化如图 13 所示。

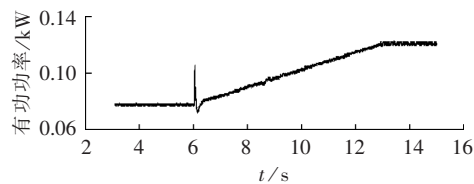
与 3.3.1 节对比可知,含有限流器模块后,系统受



(a) 1 kV 直流配电网电压



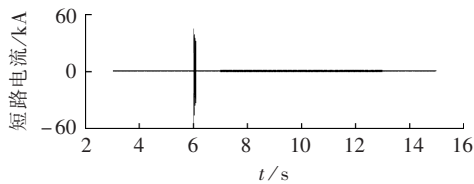
(b) 10 kV 直流配电网电压



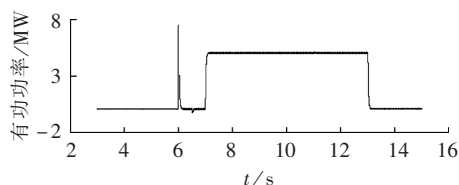
(c) 光伏发电的输出功率

图 12 含有固态限流器的直流配电网发生故障时电气量的变化

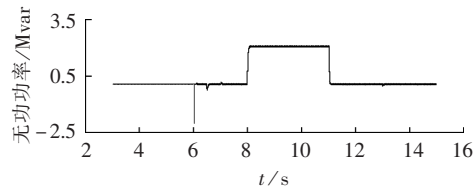
Fig.12 Variation of electrical variables during fault of DC distribution network with FCL



(a) 交流线路上的电流



(b) 交流线路上的有功功率流动



(c) 交流线路上的无功功率流动

图 13 含有固态限流器的交流配电网发生故障时电气量的变化

Fig.13 Variation of electrical variables during fault of AC distribution network with FCL

故障电流的冲击幅值显著减小,同时故障时间也大幅减少。系统包含和不包含限流器模块时,10 kV 配电网在过渡过程中的电压见图 14。

对比图 11—14 可得:6 s 时在交流线路上发生三相短路接地故障,如果系统不含限流器模块,则非故障线路的冲击电压将会达到约 18 kV,并且直到 6.1 s

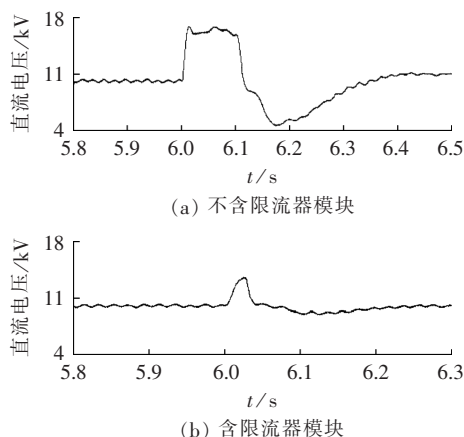


图14 包含和不包含限流器时,过渡过程中直流配电网电压对比

Fig.14 Comparison of DC distribution network voltage during transient process between with and without FLC

故障被切除后,配电网电压才能逐渐恢复为 10 kV,恢复时间约为 0.4 s;如果系统含有限流器模块,则非故障线路的冲击电压最大值约为 13 kV,并且在 6.02 s 时配电网电压就开始逐渐降低,恢复时间约为 0.04 s。这说明本文所提直流配电网拓扑结构在发生短路时能迅速投入限流器模块以限制短路电流,有效隔离故障区域,保证非故障区域正常供电。

4 结语

本文构建了含有限流式 SSSC 的直流配电网拓扑结构,利用 PSCAD/EMTDC 构建了仿真模型进行仿真,结果验证了含有限流式 SSSC 直流配电网拓扑结构不仅能够改善线路潮流,而且与不含限流器模块相比较,能够在故障条件下迅速切断短路电流,限制冲击电压,减少故障持续时间,有效隔离故障区域,保证非故障区域的直流配电网正常供电。

参考文献:

- [1] 王鹤,李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG He,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):19-23.
- [2] 汪少勇. 基于分布式电源的设计与运行[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):120-123.
WANG Shaoyong. Design and operation of micro-grid based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):120-123.
- [3] 曹一家,苗铁群,江全元. 含电动汽车换电站的微网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):1-6.
CAO Yijia,MIAO Yiqun,JIANG Quanyuan. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):1-6.
- [4] HAMMERSTROM D J. AC versus DC distribution systems-did we get it right?[C]//Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]:IEEE,2007:1-5.
- [5] GIRILLO S,MUSOLINO V,PIEGARI L,et al. Simulations and field test results for potential applications of LVDC distribution network to reduce flicker effect[C]//14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. [S.l.]:IEEE,2010:1-6.
- [6] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):98-104.
JIANG Daozhuo,ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):98-104.
- [7] 刘隽,李兴源,姚大伟,等. 静止同步串联补偿器与静止无功补偿器的相互作用分析与协调控制[J]. 电网技术,2008,32(1):20-25.
LIU Jun,LI Xingyuan,YAO Dawei,et al. Analysis on interaction between static synchronous series compensator and static var compensator and their coordination control[J]. Power System Technology,2008,32(1):20-25.
- [8] 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):107-111.
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):107-111.
- [9] 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 characteristic of static synchronous series compensator[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(19):75-80.
- [10] STARKE M R,LI Fangxing,TOLBERT L M,et al. AC vs. DC distribution;maximum transfer capability[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. [S.l.]:IEEE,2008:1-6.
- [11] STARKE M R,OLBERT L M,OZPINECI B. AC vs. DC distribution;a loss comparison[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]:IEEE,2008:1-7.
- [12] DASTGEER F,KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation[C]//Power Engineering Conference. [S.l.]:IEEE,2009:1-5.
- [13] 王丹,毛承雄,陆继明,等. 直流配电系统技术分析及设计构想[J]. 电力系统自动化,2013,37(8):82-88.
WANG Dan,MAO Chengxiong,LU Jiming,et al. Technical analysis and design concept of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(8):82-88.
- [14] LI Guangkai,LI Gengyin,ZHAO Chengyong,et al. Research on voltage source converter based DC distribution network[C]//2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. [S.l.]:IEEE,2007:1927-1932.
- [15] AGUSTONI A,BORIOLI E,BRENNNA M,et al. LV DC distribution network with distributed energy resources:analysis of possible structures[C]//18th International Conference on Electricity Distribution. [S.l.]:IEEE,2005:1-5.
- [16] 阎博,江道灼,吴兆麟,等. 具有短路限流功能的统一潮流控制器设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):69-73.
YAN Bo,JIANG Daozhuo,WU Zhaolin,et al. Design of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(4):69-73.
- [17] 朱克平,江道灼,胡鹏飞. 含电动汽车充电站的新型直流配电网研究[J]. 电网技术,2012,36(10):35-41.
ZHU Keping,JIANG Daozhuo,HU Pengfei. Study on a new type of DC distribution network containing electric vehicle

(下转第 121 页 continued on page 121)

Control strategy based on dual-loop controller for split-capacitor-type three-phase-four-wire DSTATCOM

ZHOU Chen¹,ZHENG Yihui¹,WANG Xin¹,LI Lixue¹,ZHOU Lidan²,ZHANG Yang³

- (1. Center of Electrical & Electronic Technology,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;
- 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion,Ministry of Education, Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;
- 3. Songyuan Power Supply Company,Jilin Electric Power Co. Ltd.,Songyuan 138000,China)

Abstract: An analysis model is established aiming at the inaccuracy of split-capacitor-type three-phase-four-wire DSTATCOM used in the reactive power compensation for unbalanced load and its control strategy based on dual-loop controller is proposed aiming at the poor periodic signal tracking of the traditional PI controller. It combines the PI controller,which has quick response to instruction,with the repetitive controller,which has high accuracy of periodic signal control,and applies the dual-loop controller in the inner current loop of DSTATCOM to track the current. The design of the controller is analyzed in detail and verified by simulation and experiment. Results indicate that,the split-capacitor-type three-phase-four-wire DSTATCOM controlled by the proposed strategy has better compensation effect than by the traditional PI control method,guarantees the response speed,improves the accuracy of current tracking,achieves the reactive power compensation for the unbalanced load, reduces output current and THD,and improves the quality of grid-connection current.

Key words: unbalanced load; three-phase-four-wire; DSTATCOM; split capacitor type; dual-loop controller; PI control; repetitive control; reactive power compensation

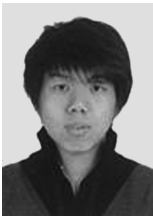
.....

(上接第 113 页 continued from page 113)

charge station[J]. Power System Technology,2012,36(10):35-41.

作者简介:

杜 翼(1990-),男,福建南平人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电网、电力电子在电力系统中的应用和分布式发电(E-mail:duyifromzju@163.com);
朱克平(1987-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究



杜 翼

方向为直流配电网、电力电子在电力系统中的应用及分布式发电;
江道灼(1960-),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为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。

DC distribution network containing SSSC-FCL

DU Yi¹,ZHU Keping²,JIANG Daozhuo¹,WANG Yufen¹,YIN Rui¹

- (1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027,China;
- 2. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310003,China)

Abstract: SSSC-FCL,a combination of SSSC(Static Synchronous Series Compensator) and FCL(Flexible Current Limiter),is applied in DC distribution network to improve its power quality and reliability,for which,a dual-layer-ring topology is proposed. It is modeled with PSCAD/EMTDC and the normal and faulty operations of DC distribution network are simulated. Simulative results show that,SSSC-FCL adjusts the line power flows; during system fault,the short-circuit rush currents of faulty lines are effectively limited by its FCL while the healthy lines keep the normal operation;the reliability of DC distribution network is improved.

Key words: distribution network; distributed power generation; SSSC-FCL; topology; computer simulation; model buildings