

# 无变压器 SSSC 的模型及控制方式研究

张茂松<sup>1,2</sup>, 崔颖<sup>1</sup>, 王群京<sup>1,3</sup>, 郑常宝<sup>1,3</sup>, 钱喆<sup>1,3</sup>

(1. 安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽大学  
工业节电与电能质量控制协同创新中心, 安徽 合肥 230601; 3. 安徽  
大学 教育部电能质量工程研究中心, 安徽 合肥 230601))

**摘要:**针对静止同步串联补偿器(SSSC)系统应用中配备耦合变压器存在的损耗、体积以及成本等问题, 基于级联 H 桥多电平逆变器的拓扑结构, 提出了一种无需耦合变压器的 SSSC 系统结构。对无变压器 SSSC 的拓扑结构进行了介绍, 在  $d-q$  旋转坐标系下建立了 SSSC 的动态模型, 并对恒电压、恒阻抗、恒功率 3 种控制方式进行了详细的理论推导, 提出了一种简单有效的控制策略。最后针对恒电压控制方式搭建了 Matlab/Simulink 仿真模型, 实验结果证明了该模型及控制策略的可行性。

**关键词:**无耦合变压器; 静止同步串联补偿器(SSSC); 恒电压控制; 恒阻抗控制; 恒功率控制

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20632

## Study on the Model and Control Mode of the Transformerless Static Synchronous Series Compensator

ZHANG Maosong<sup>1,2</sup>, CUI Ying<sup>1</sup>, WANG Qunjing<sup>1,3</sup>, ZHENG Changbao<sup>1,3</sup>, QIAN Zhe<sup>1,3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China;  
2. Collaborative Innovation Center of Industrial Energy-saving and Power Quality Control,  
Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China; 3. Engineering Research Center of Power  
Quality, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of loss, volume and cost of coupling transformer in static synchronous series compensator(SSSC) system application, a transformerless SSSC system structure based on the topological structure of cascade H-bridge multilevel inverter was proposed. The topological structure of SSSC without transformer was introduced, the dynamic model of SSSC was established under the  $d-q$  rotating coordinate system, and the three control modes of constant voltage, constant impedance and constant power were deduced in detail. Then a simple and effective open-loop control strategy was proposed. Finally, the Matlab/Simulink simulation model was built for the constant voltage control mode, and the experimental results show the feasibility of the model and control strategy.

**Key words:** transformerless; static synchronous series compensator(SSSC); constant voltage control; constant impedance control; constant power control

随着互联电网规模的不断扩大、复杂度不断提高,潮流控制问题更加困难。静止同步串联补偿器(SSSC)是一种新型的柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)设备,具有快速调节线路潮流和广泛补偿的能力<sup>[1]</sup>。SSSC通过向线路中注入与线路电流垂直的可控电压,来对线路潮流进行控制和分配,可以很好地调节系统的潮流。与传统的可控串联

补偿器相比而言,SSSC响应速度快、输出谐波含量少、能够避免系统谐振以及次同步振荡<sup>[2]</sup>,SSSC的研究对提高电力系统的稳定性、增强线路功率传输能力具有十分重要的现实意义。

文献[3]采用 H 桥级联结构的拓扑结构,计算出了在不同调制方式下的阻抗补偿域;文献[4]提出了针对 H 桥级联 SSSC 拓扑结构的主参数设计原则。但是上述文献中的拓扑结构均应用

**基金项目:**安徽省新能源汽车暨智能网联产业技术创新工程项目;宽温域长寿命燃料电池公交车整车研发

**作者简介:**张茂松(1984—),男,博士,讲师,Email:mszh16@hotmail.com

了耦合变压器,增加了 SSSC 的体积和成本,同时也带来了一定程度的损耗。文献[5]基于无变压器 UPQC 结构提出了一种串并联协调控制策略,但是该控制策略计算复杂,并且未对串联补偿器进行详细的理论分析。

本文基于级联 H 桥多电平逆变器拓扑结构提出了一种无需耦合变压器的 SSSC 系统结构。无耦合变压器 SSSC 充分利用了级联 H 桥结构多电平模块化易扩展的优势,通过功率单元级联可以很容易地实现高电平,控制方式简单、动态响应更快<sup>[6]</sup>。文中对无耦合变压器的级联 H 桥式 SSSC 拓扑结构及其工作原理进行了介绍,在  $d-q$  旋转坐标系下建立了 SSSC 的动态模型。该 SSSC 采用 H 桥级联直接接入输电系统接线方式,采用了电压外环和电流内环相结合的控制策略。最后通过 Matlab/Simulink 仿真平台进行验证,实验结果证明了该模型及控制策略的可行性。

## 1 SSSC 基本原理及拓扑结构

SSSC 近似等效于一个幅值和相位都可以调节的电压源,该电压与线路电流呈垂直关系,通过改变该电压的幅值和相位就可以调节线路潮流<sup>[7]</sup>。

图 1 为 SSSC 的等效电路图,其中,  $U_s, U_r$  分别为系统发送端和接收端的电压,  $U_s$  和  $U_r$  的相角差为  $\theta$ ;  $U_c$  为逆变器输出电压,  $I$  为输电线路流过的电流,相角为  $\delta$ ;  $X_c$  和  $X_L$  分别为 SSSC 装置的等效阻抗和线路阻抗。

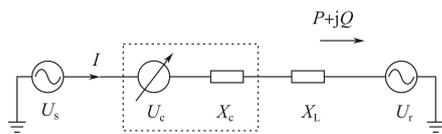


图 1 SSSC 等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of SSSC

在无补偿状态线路电流为

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_r}{jX_L} = \frac{U_s \sin\theta}{X_L} - j \frac{U_s \cos\theta - U_r}{X_L} \quad (1)$$

接入 SSSC 之后线路电流表示为

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_r - \dot{U}_c}{jX_L} = \left( \frac{U_s \sin\theta}{X_L} - j \frac{U_s \cos\theta - U_r}{X_L} \right) \cdot \left( 1 + \frac{U_s}{\sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos\theta}} \right) \quad (2)$$

由式(2)可知,SSSC 输出电压只改变线路电流幅

值的大小,并不影响其相角。当电压超前线路电流时,SSSC 工作在感性模式,线路的传输功率降低。相反,当 SSSC 工作在电容模式时,SSSC 的注入电压增加,线路输送功率增加<sup>[8]</sup>。

SSSC 主要由逆变器、并联电容器和控制器组成,其中逆变器和控制器是它的核心部分。SSSC 逆变器的主要拓扑结构为三相桥式结构、多重化结构和多电平结构。其中,级联式多电平结构模块化易扩展,可以实现需要的任何高电平。更适用于高压大容量 FACTS 设备应用<sup>[9]</sup>。同时,级联式多电平拓扑结构没有钳位二极管和飞跨电容的限制,输出相同级别的电平时所需的组件数量较少,控制系统简单,模块化易于扩展,故本文中 SSSC 拓扑采用了级联多电平拓扑结构。

## 2 无变压器 SSSC 控制方式

总结国内外 SSSC 相关可供参考的文献,控制方式大致可以分为 3 种:恒电压控制、恒阻抗控制以及恒功率控制。

无变压器 SSSC 系统模型如图 2 所示,SSSC 装置采用级联 H 桥结构直接接入系统<sup>[10-11]</sup>。发送端电压为  $U_s$ ,补偿电压为  $U_c$ ,  $U_s$  与  $U_c$  组成新的发送端电压  $U_{ss}$ 。接收端电压  $U_r$ ,线路等效阻抗  $X_{se}$ ,线路上流过的电流为  $I_L$ 。

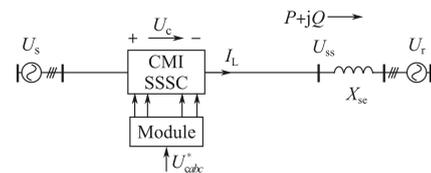


图 2 无变压器 SSSC 系统模型

Fig. 2 System model without transformerless SSSC

由基尔霍夫电压定律得到如下动态方程:

$$\begin{cases} U_{ssa} = L_{se} \frac{di_{L_a}}{dt} + R_{se} I_{L_a} + U_{ra} \\ U_{ssb} = L_{se} \frac{di_{L_b}}{dt} + R_{se} I_{L_b} + U_{rb} \\ U_{ssc} = L_{se} \frac{di_{L_c}}{dt} + R_{se} I_{L_c} + U_{rc} \end{cases} \quad (3)$$

引入  $d-q$  旋转坐标系,对其进行变换得到

$$\begin{cases} U_{ssd} = L_{se} \frac{dI_{L_d}}{dt} + R I_{L_d} - \omega L_{se} I_{L_q} + U_{rd} \\ U_{ssq} = L_{se} \frac{dI_{L_q}}{dt} + R I_{L_q} + \omega L_{se} I_{L_d} + U_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

分析电压之间的关系得知  $U_c = U_s - U_{ss}$ ,

那么:

$$\begin{cases} U_{cd} = U_{sd} - U_{ssd} = U_{sd} - \left[ L_{se} \frac{dI_{ld}}{dt} + RI_{ld} - \omega L_{se} I_{lq} + U_{rd} \right] \\ U_{cq} = U_{sq} - U_{ssq} = U_{sq} - \left[ L_{se} \frac{dI_{ld}}{dt} + RI_{lq} + \omega L_{se} I_{ld} + U_{rq} \right] \end{cases} \quad (5)$$

### 2.1 恒电压与恒阻抗控制方式

SSSC 与系统的有功功率交换时会导致直流电压的不稳定<sup>[12]</sup>。取三相直流侧电压平均值  $U_{dc} = \frac{1}{3}(U_{dcA} + U_{dcB} + U_{dcC})$ , 直流侧电压参考值与平均值  $U_{dc}$  相减后经比例积分控制器得到 SSSC 补偿电压的  $d$  轴分量参考值  $U_{cd}^*$ 。  $U_{cd}^*$  与 SSSC 补偿电压  $d$  轴分量的差值经 PI 控制器得到电流参考值  $I_{ld}^*$ 。

图 3 为恒电压控制方式框图。

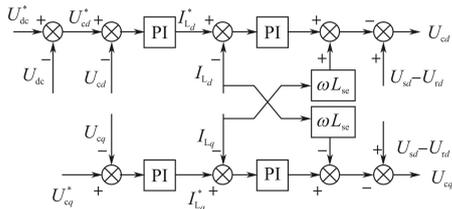


图 3 恒电压控制方式框图

Fig. 3 control mode with constant voltage

恒阻抗控制方式与恒电压控制方式本质相同,它是 SSSC 控制中最基本的控制方式。恒阻抗控制将 SSSC 输出阻抗保持在恒定值,并通过调节阻抗值来调节线电流。此时  $q$  轴的电压参考量  $U_{cq}^*$  由装置的等效阻抗  $X^*$  与线路电流相乘后得到。

### 2.2 恒功率控制方式

SSSC 的补偿方式分为感性补偿和容性补偿 2 种。

SSSC 补偿状态向量图如图 4 所示。

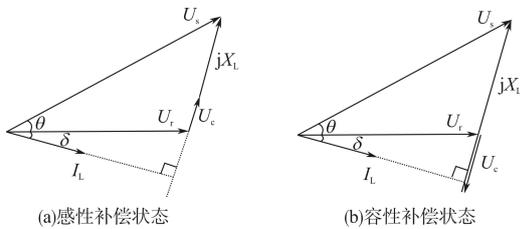


图 4 SSSC 补偿状态向量图

Fig. 4 Vector diagrams in SSSC compensated state

在感性补偿方式下,无变压器 SSSC 的补偿电压超前电流  $\pi/2$ ,容性补偿情况则相反。那么

可知投入 SSSC 以后,线路电流为

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{U_s \angle \theta - U_r \angle 0^\circ - U_c \angle \delta}{X_{se}} \\ &= \left[ \frac{U_s \sin \theta}{X_{se}} - j \frac{U_s \cos \theta - U_r}{X_{se}} \right] \cdot \left[ 1 \pm \frac{U_c}{\sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

通过计算可知线路首末端功率为

$$\begin{cases} S_1 = U_s I_L^* = P_1 + jQ_1 \\ = \left[ \frac{U_s U_r \sin \theta}{X_{se}} + j \frac{U_s^2 - U_s U_r \cos \theta}{X_{se}} \right] \cdot \left[ 1 \pm \frac{U_c}{\sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}} \right] \\ S_2 = U_r I_L^* = P_2 + jQ_2 \\ = \left[ \frac{U_s U_r \sin \theta}{X_{se}} + j \frac{U_s U_r \cos \theta - U_r^2}{X_{se}} \right] \cdot \left[ 1 \pm \frac{U_c}{\sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中:下标 1,2 分别为首、末端变量。

由式(7)知,补偿前后首末两端的无功功率差值分别为

$$\begin{cases} \Delta Q_1 = \frac{U_s^2 - U_s U_r \cos \theta}{X_{se}} \cdot \frac{U_c}{\sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}} \\ \Delta Q_2 = \frac{U_s U_r \cos \theta - U_r^2}{X_{se}} \cdot \frac{U_c}{\sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}} \end{cases} \quad (8)$$

那么输电线路上的无功损耗  $\Delta Q_L$  为

$$\begin{aligned} \Delta Q_L &= X |I|^2 = \frac{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}{X_{se}} \cdot \left[ 1 \pm \frac{U_c}{\sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

由上得到 SSSC 注入系统的无功功率  $\Delta Q_C$  为

$$\begin{aligned} \Delta Q_C &= \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_L \\ &= U_c \frac{2U_s^2 - 2U_s U_r \cos \theta}{X_{se} \sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}} + \frac{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}{X_{se}} \end{aligned} \quad (10)$$

进而可以求得 SSSC 注入系统的电压:

$$U_c = \left[ \Delta Q_C - \frac{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}{X_{se}} \right] \cdot \frac{X_{se}}{2U_s^2 - 2U_s U_r \cos \theta} \cdot (\sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_s U_r \cos \theta}) \quad (11)$$

$U_c$  经过  $dq$  变换得到  $d, q$  轴电压参考量,即可作

为电压环的输入。

图 5 为恒功率的控制方式框图。

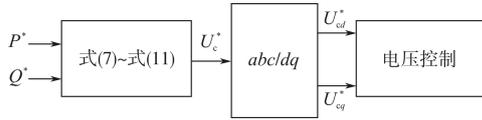


图 5 恒功率控制方式框图

Fig. 5 The block diagram for the control mode with constant power

以上 3 种控制方式中,恒阻抗控制方式和恒电压控制方式相较于恒功率控制方式而言应用更多。前 2 种控制方式中,输入参考值通过简单计算就可以直接给定,而恒功率控制方式计算过程相对复杂,实现起来仍需克服许多技术难点。

### 3 直流侧电压控制

在理想情况下,直流侧电容彼此独立,各 H 桥逆变单元个数以及各参数完全相同,其直流侧电容电压可以一直保持平衡。然而,在实际运行中,由于开关器件会出现损耗、脉冲存在延时等问题,随着时间的积累,这些问题会使直流侧电压波动出现相间或者相内的不平衡现象<sup>[13-14]</sup>,因此加入对直流侧电压的均衡控制,才能保证 SSSC 正常稳定的工作。

级联 H 桥结构中同一相中的功率单元流过的电流相同,那么可以通过调节流过的电流来控制直流输出电压。图 6 为电压修正量的生成控制框图。

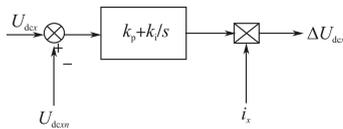


图 6 电压修正量生成控制框图

Fig. 6 The block diagram of generation control with voltage correction

图 6 中  $U_{dcn}$  为  $x(x=a,b,c)$  相第  $n$  个子模块的电容电压,  $U_{dcr}$  为  $x$  相  $n$  个子模块直流侧电压的平均值,即  $U_{dcr} = \frac{1}{n} \sum_1^n U_{dcn}$ 。将  $U_{dcr}$  与  $U_{dcn}$  作差,其差值作为 PI 调节器的输入,由此得到参考电压修正量:

$$\Delta U_{dcr} = (k_p + k_i/s)(U_{dcr} - U_{dcn})i_x \quad x=a,b,c \quad (12)$$

式中:  $k_p$  和  $k_i$  分别为比例系数和积分系数;  $i_x$  为流经 H 桥  $a,b,c$  三相的电流。由此可以通过加

入参考电压修正量来克服相内各 H 桥单元模块的差异性。

### 4 实验结果分析

本文以 Matlab 仿真平台为基础搭建了电压等级 11 kV 的仿真模型,该仿真应用了恒电压控制方式。模型系统主要参数如下:首末端电压为 11 kV,首末端相角差为  $30^\circ$ ,系统频率为 50 Hz,线路阻抗为 70 mH,直流侧电容为 0.01 F。

图 7 和图 8 分别为恒电压控制方式下感性补偿和容性补偿时 SSSC 注入电压和线路电流的波形图。可以看到,在感性补偿时,SSSC 注入电压超前线路电流  $90^\circ$ ,线路电流减小,相反在容性补偿时,SSSC 注入电压滞后线路电流  $90^\circ$ ,且线路电流增加。

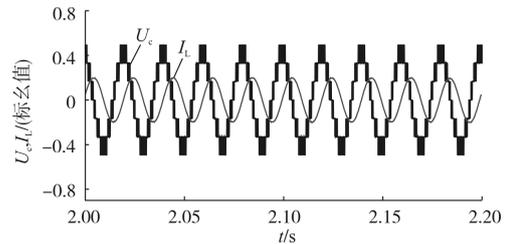


图 7 感性补偿时 SSSC 注入电压与线路电流波形图

Fig. 7 Waveforms of SSSC injection voltage and line current during inductive compensation

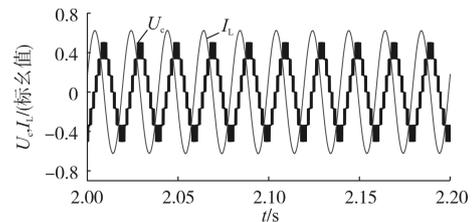


图 8 容性补偿时 SSSC 注入电压与线路电流波形图

Fig. 8 Waveforms of SSSC injection voltage and line current during capacitive compensation

图 9、图 10 为感性补偿和容性补偿方式下线路的有功、无功变化曲线。由图 9、图 10 可以看出,输电线路原来的有功负荷 2.751 MW,无功负荷  $-0.738$  Mvar,在 1 s 时刻 SSSC 装置开始进行补偿,在感性补偿下,线路的有功潮流减小、无功潮流增加。相反在容性补偿条件下,有功潮流增加,无功潮流减小。无变压器 SSSC 总的级联 H 桥单元个数为 18。图 11 为加入均衡控制后单个 H 桥单元的直流侧电压值。直流侧电压采用分步充电的方式,0~0.5 s 将直流侧充电至 500 V,0.5~0.6 s 将直流侧充电到 1 000 V。从图

11 中可以看出,在 0.72 s 直流侧电压就达到并稳定在了 1 000 V,各 H 桥逆变单元直流侧电压波形基本一致,即其各单元电压已均衡。稳态特性良好直流侧电压控制效果良好。

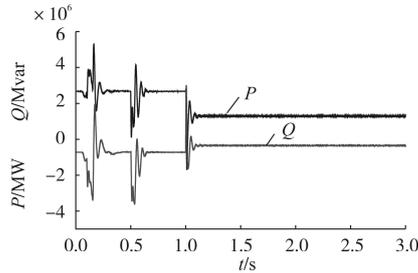


图 9 感性补偿时线路有功和无功功率变化

Fig. 9 Changes in active and reactive power of the line with inductive compensation

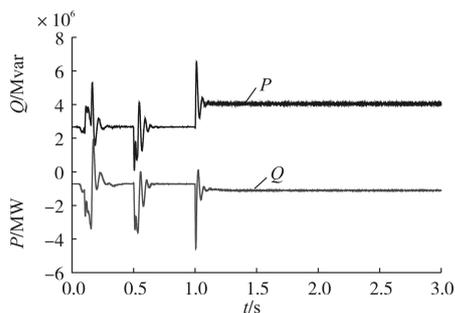


图 10 容性补偿时线路有功和无无功功率变化

Fig. 10 Changes in active and reactive power of the line with capacitive compensation

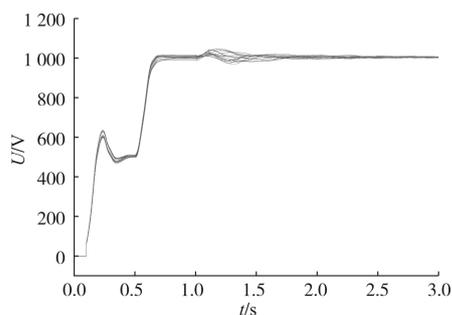


图 11 加入直流侧均衡控制后单个 H 桥模块直流侧电压值

Fig. 11 DC side voltage value of single H bridge module with DC side equalization control is added

## 5 结论

考虑到 SSSC 系统应用中配备耦合变压器存在的损耗以及成本等问题,提出了一种无变压器的 SSSC 系统结构。

1)详细介绍了恒电压、恒阻抗以及恒功率 3 种不同的控制方式,并对每一种控制方式进行了

相关控制策略的分析,最后以恒电压控制方式为基础搭建了 11 kV 的无变压器 SSSC 模型。

2)通过添加电压修正量以及对电压外环进行控制实现了直流侧电容电压的稳定,从而保证了无变压器 SSSC 输出电压的准确性。

3)经过 Matlab/Simulink 仿真验证,本文建立的无变压器 SSSC 模型具有同传统变压器模型一样的补偿效果,无论是在感性补偿条件还是容性补偿条件下,都能对参考信号实现准确地跟踪,进行良好地无功补偿。

## 参考文献

- [1] 刘黎明,康勇,陈坚,等. SSSC 建模、控制策略及性能[J]. 电工技术学报,2006,21(9):37-43.
- [2] Javeed K, Saikumar H Y, Sharath R S Y. Comparative Analysis of Robust PSS and Robust Supplementary Modulation Controller for SSSC[J]. Biennial International Conference on PESTSE, 2016, 16(8): 4673-6658.
- [3] 姜旭,肖湘宁,赵洋. H 桥级联式 SSSC 阻抗补偿域及准稳态模型[J]. 电工技术学报,2007,22(4):136-143.
- [4] 陆振纲,宋洁莹,宋方方,等. 级联 H 桥 SSSC 主参数设计和控制技术研究[J]. 智能电网,2017,5(6):536-543.
- [5] 袁帅,陈阿莲,潘羿威,等. 一种单相无隔离变压器 UPQC 的控制策略研究[J]. 电工电能新技术,2018,37(6):10-17.
- [6] 王奎,郑泽东,李永东. 一种新型的无变压器级联型多电平变换器拓扑[J]. 电工技术学报,2011,26(8):1-6.
- [7] 李胜,张建华,蒋程,等. SSSC 的有功和无功解耦策略[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(12):20-22.
- [8] 刘慧威. 静止同步串联补偿器的数学建模及其仿真研究[D]. 北京:华北电力大学,2006.
- [9] 姜旭. H 桥级联式 SSSC 主电路拓扑分析及控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
- [10] Yang S, Liu Y, Wang X, et al. Modulation and Control of Transformerless UPFC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1050-1063.
- [11] Peng F Z, Liu Y, Yang S, et al. Transformer-less Unified Power-flow Controller Using the Cascade Multilevel Inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5461-5472.
- [12] 李玲玲,鲁修学,吉海涛,等. 级联 H 桥型 SVG 直流侧电压平衡控制方法[J]. 电工技术学报,2016,31(9):1-7.
- [13] 李家旺. 新型通用配电网静止同步补偿器拓扑及其直流电压控制策略研究[D]. 合肥:安徽大学,2018.
- [14] 徐榕. H 桥级联 STATCOM 非线性控制策略及系统实现技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

收稿日期:2019-07-30

修改稿日期:2019-12-09