

基于粒子群算法的 SVC 抑制阻尼系统 振荡控制器设计

蔡卫江¹, 李雪峰², 赵士正³

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214;
3. 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要:作为柔性交流输电系统(FACTS)的重要装置之一,静止无功补偿器(SVC)有助于提高电力系统稳定运行。通过分析发电机转子方程可知, SVC 常规的恒压控制不能起到抑制阻尼系统振荡的作用,而采用了附加阻尼控制后,系统的动态稳定性明显得到提高。在此背景下,设计一种基于 SVC 的功率振荡阻尼(POD)控制器,其采用 PSO 优化算法对控制器参数进行自适应优化,并选择合适的阻尼控制输入信号对控制信号进行相位补偿。利用 Simulink 仿真软件建立包含 SVC 的 Heffron-Philips 的系统模型。基于此模型对所提方法的性能进行详细的研究,运用时域仿真方法验证,与传统的电力系统稳定器(PSS)控制器进行对比体现设计控制器的优越性。

关键词:SVC; POD; 低频振荡; 粒子群优化算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.008 中图分类号:TM761 文章编号:1673-9140(2020)05-0060-06

Design of oscillation controller of SVC damping system based on particle swarm algorithm

CAI Weijiang¹, LI Xuefeng², ZHAO Shizheng³

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, China; 3. East China Investigation and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: As one of the important devices of the flexible AC transmission system (FACTS), the static var compensator (SVC) helps to improve the stable operation of the power system. By analyzing the generator rotor equation, it can be obtained that the conventional constant voltage control of SVC can not play the role of restraining the oscillation of the damping system. After the additional damping control is adopted, the dynamic stability of the system is obviously improved. This paper designs a SVC-based power oscillation damping (POD) controller, which uses the PSO optimization algorithm to adaptively optimize the controller parameters, and selects the appropriate damping control input signal to compensate the control signal. This paper uses simulink simulation software to establish a Heffron-Philips system model including SVC. Based on this model, the performance of the proposed method is studied in detail, verified by time-domain simulation method, and compared with the traditional power system stabilizer (PSS) controller to show the superiority of the designed controller.

Key words: SVC; POD; damping of oscillations; particle swarm optimization

为了保证电力系统安全稳定运行,必须抑制电力系统的振荡,包括区域内振荡和区域间振荡。这些振荡通常产生较大的频率偏差,系统的阻尼作用对于系统振荡的抑制十分重要。由于系统的运行方式变化多样,因此需要采用鲁棒性更好的控制器来适应尽可能多的运行方式。

目前,主要采用电力系统静态稳定器(power system stabilizer,PSS)来抑制电力系统中的低频振荡^[1-3],但研究表明振荡频率低于 0.3 Hz 时采用 PSS 并不能很好地抑制低频振荡。静止无功补偿器(static var compensator,SVC)是柔性交流输电系统(flexible AC transmission,FACTS)装置之一,用于并联补偿以维持电压幅值,是提高电力系统的稳定性措施之一^[4]。如果利用 SVC 快速调节其补偿电抗的能力,能够有效提升系统低频振荡时的阻尼。近年来,利用 SVC 抑制系统振荡的研究得到了广泛的重视。文献[5]通过对 Heffron-Philips 模型的阻尼和同步分析,研究了一般单机无穷大母线系统的 SVC 阻尼控制方案,然而,没有提出采用阻尼控制方案来设计功率振荡阻尼(power oscillation damping,POD)控制器。文献[6]对一般的两机电力系统模型进行了分析,采用的是灵敏度分析方法,并对结果进行了验证,但是并没有分析控制器的线性化模型;文献[7]提出了基于图形的 SVC 仿真和最优 PI 控制器设计,目的是利用 Simulink 模型寻找这些补偿器的最优参数,以提高系统在多种工况下的系统参数和阻尼,并进一步改善系统的稳态及暂态性能^[8-9]。但上述文献使用的是非线性模型,耗时长,寻优过程复杂。

该文结合 SVC 的特点,提出了一种基于 SVC 的 POD 控制器的方案。采用粒子群算法对控制器参数进行优化选择并建立了包括 SVC 模块的线性化 Heffron-Philips 模型,设计了简化的 POD 线性传递函数框图。通过 MATLAB/SIMULINK 软件将计算、可视化和编程集成在一起^[10-13],对所研究的控制方案进行了仿真。仿真分析的结果充分验证了该文提出方法的正确性。

1 含有 SVC 的电力系统数学模型

SVC 是用来调节电压大小的 FACTS 装置,其

主要功能是通过无功负载调节保护负荷的电压大小。当检测到负荷电压变化时,SVC 将进行补偿,保证母线电压幅值。如图 1 所示,假设单机无穷大系统同步发电机输入的机械功率为 P_m ,通过数学推导建立含有 SVC 的单机系统的动态数学模型^[14-17]。

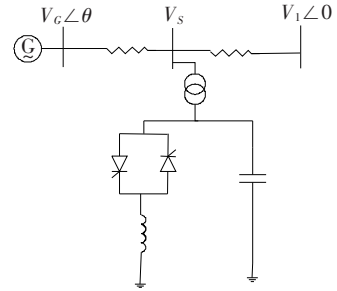


图 1 单机无穷大系统 SVC 模型

Figure 1 SVC model of single-machine infinite bus system

未装设 SVC 的单机无穷大系统的非线性方程:

$$\begin{cases} d\delta/dt = \omega_0 \Delta\omega \\ d\omega/dt = [P_m - P_e - D\Delta\omega]/T_J \\ dE'_q/dt = (E_{fd} - E_q)/T'_{d0} \end{cases} \quad (1)$$

$$dE_{fd}/dt = -E_{fd}/T_A + K_A(V_{S0} - V_S)/T_A$$

常用 SVC 模型的等效导纳为

$$Y_{SVC} = jB_{SVC} = 2(\alpha - \sin 2\alpha)j/\pi X_C \quad (2)$$

为简化推导,设 SVC 的稳定控制为纯增益控制:

$$\alpha = \alpha_0 + C_V(V_{S0} - V_S) + C_S\omega_0 \Delta\omega \quad (3)$$

结合式(1),加有 SVC 控制的单机系统线性化后动态方程为

$$\begin{aligned} d\Delta\omega/dt &= -(K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q + K_3\Delta\alpha)/T_J \\ \frac{d\Delta E'_q}{dt} &= \frac{(\Delta E_{fd} - K_3\Delta\delta - K_4\Delta E'_q - K_5\Delta\alpha)}{T'_{d0}} \\ \frac{d\Delta E_{fd}}{dt} &= \frac{\Delta E_{fd} + K_A(K_6\Delta\delta + K_7\Delta E'_q + K_8\Delta\alpha)}{T_A} \end{aligned} \quad (4)$$

同时,对于 SVC 可得

$$\Delta\alpha = \frac{C_S\omega_0 \Delta\omega}{(1 + C_3C_V)} - \frac{(C_1\Delta\delta + C_2\Delta E'_q)}{(1 + C_3C_V)}C_V \quad (5)$$

式(1)中 δ 为功角; ω_0 为基准角速度; P_e 为电磁功率; P_m 为机械功率; D 为阻尼系数; T_J 为惯性时间常数; E'_q 为暂态电势; E_{fd} 为励磁电压; E_q 为空载电势; T'_{d0} 为发电机纵轴暂态开路时间常数; V_S 为 s 点电压; V_{S0} 为 s 点额定电压; K_A 和 T_A 为自动电

压调节器参数。式(2)中, α 为晶闸管触发角; X_C 为电容电抗。式(3)中, C_V 、 C_S 为可调系数。式(4)中, K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 、 K_6 、 K_q 、 K_e 、 K_t 、 K_A 为公式整理后变量前的系数; $\Delta\omega$ 为角速度增量; $\Delta E'_q$ 为暂态电势增量; ΔE_{fd} 为励磁电压增量; $\Delta\delta$ 为功角增量; $\Delta\alpha$ 为晶闸管触发角增量。式(5)中, C_1 、 C_2 、 C_3 为 SVC 各支路中的电容值。

上述公式推导可得装有 SVC 的系统控制框图, 结构如图 2 所示。

此时从系统的控制模型可以直观地看出, 在系统遭受扰动后, SVC 通过参考输入信号 $\Delta\omega$ 对可调参数 C_V 、 C_S 进行合理选择即可对功率振荡起到抑制作用。

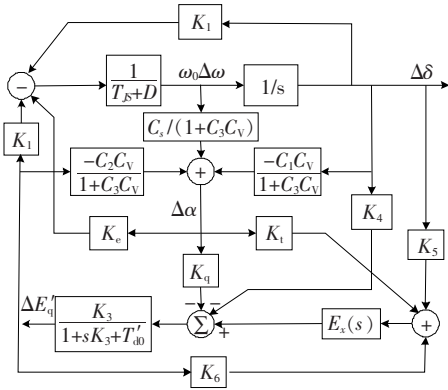


图 2 含有 SVC 的系统控制模型

Figure 2 System control model with SVC

2 SVC-POD 控制器

SVC 与单机无穷大系统相连接时, SVC 的控制参数 α 的控制参见式(3), 令其中 $C_V=1$ 。如图 3 所示, SVC 的控制参数选择 K_D 为附加阻尼控制器的增益; T_W 是隔直时间常数; T_1 和 T_2 是时间超前滞后环节时间常数进行的调整, 可以使原系统有效地增加振荡阻尼。其中 K_c 是 SVC 的系数, T_c 是时间常数, X_L 是感抗。在 SVC-POD 控制器上, 采用的 POD 可视为包括 2 个级联框图。方框 1 用于导出速度偏差信号, 在 SVC 位置测量总功率, 然后将其与设定点(机械功率)进行比较。将误差积分并乘以 $1/M$, 得到速度偏差信号。需要注意的是, 所导出的速度偏差信号代替了所测量的速度偏差信号,

因为在静态无功补偿器位置可能无法获得一般的速度偏差信号。方框 2 类似于 PSS 结构包括超前滞后补偿器, 为了提高电力系统振荡的阻尼性能, 需要产生带有速度偏差的相量转矩。选择了超前滞后补偿器的参数, 以补偿控制信号之间的相移和由此产生的速度误差。这样, 通过速度偏差获得电压输出。设置合适的 POD 的增益 K_D , 以达到机电模式所需的阻尼比。

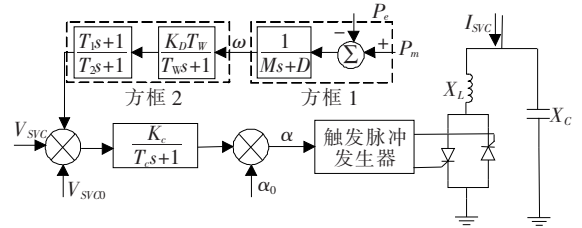


图 3 SVC-POD-II 型控制器

Figure 3 SVC-POD-II controller

3 PSO 算法对参数优化

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种基于全局搜索的智能优化算法, 具有自适应能力强、收敛速度快及优化精度高的特点。将 SVC-POD 控制器的控制参数 K_D 、 T_W 、 T_1 和 T_2 的常规值作为粒子群优化的初始参数, 各参数群体在特定的搜索空间中优化。

该文选择的 ITAE 性能评价指标具有很好的工程实用性和选择性, 其定义:

$$T[K_D, T_1, T_2, T_W] = \int_0^t t \cdot \Delta\omega dt \quad (6)$$

定义在一个 C 维搜索空间中, n 个粒子组成的粒子群中, $\mathbf{X}_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ic}]^T$ 表示第 i 个粒子的空间位置; 粒子速度为 $\mathbf{V}_i = [V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{ic}]^T$, 对应的个体极值 $\mathbf{P}_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ic}]^T$; 种群群体极值为 $\mathbf{P}_G = [P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gc}]^T$ 。每次迭代过程中, 粒子由极值迭代的速度及位置更新:

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \mathbf{X}_i^k + \mathbf{V}_i^{k+1} \quad (7)$$

$$\mathbf{V}_i^{k+1} = \omega \mathbf{V}_i^k + c_1 r_1 (\mathbf{P}_i^k - \mathbf{X}_i^k) + c_2 r_2 (\mathbf{P}_G^k - \mathbf{X}_i^k) \quad (8)$$

式中 ω 为惯性权重; k 为迭代次数; c_1 、 c_2 为非负常数, 称为加速因子。其流程如图 4 所示。

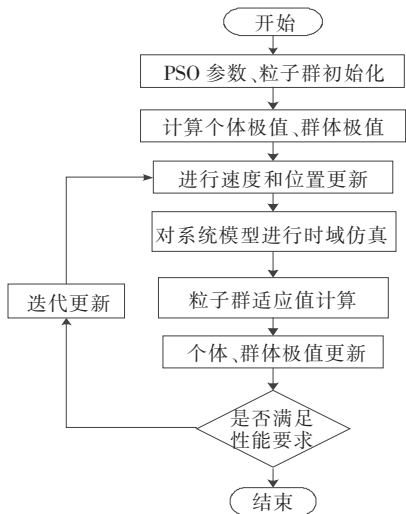


图 4 PSO 算法流程

Figure 4 PSO algorithm flow chart

4 仿真分析

该文采用了时域仿真分析分别对机械功率变化和电磁功率变化 2 种情况下的稳定性进行研究。

4.1 机械功率变化时的稳定分析

仿真模型:

① 机械扰动 $P_m = 0.1$ p. u., 加 SVC-POD 控制器时系统振荡情况。

② 机械扰动 $P_m = 0.1$ p. u., 加 PSS 控制器时系统振荡情况。

4.1.1 SVC-POD 控制器时域仿真结果

SVC-POD 控制器各环节常规参数与 PSO 算法得到的参数对比如表 1 所示, 数字仿真结果如图 5 所示, 在振荡频率小于 0.3 Hz 时, SVC-POD 控制器可以快速地抑制振荡, 有效地降低转速偏差峰值, 提高系统的稳定性。

表 1 PSO 优化前后参数比较

Table 1 Comparison of PSO parameters before and after optimization

SVC-POD 参数	常规参数	PSO 优化参数
T_D	0.3	1.720
T_1	0.6	1.211
T_2	0.5	3.754
T_w	10.0	13.920

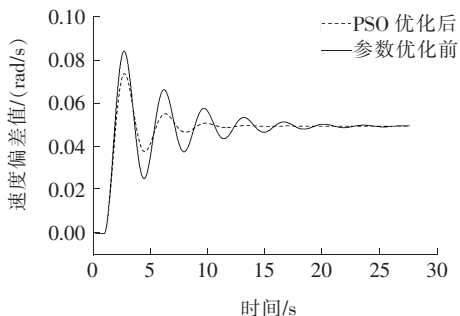


图 5 SVC-POD 控制器仿真结果

Figure 5 Simulation results of SVC-POD controller

4.1.2 与传统 PSS 控制的对比分析

PSS 的设计目标是抑制电网低频振荡不稳定增加电网的功率传输, 因此, 电力系统在受到大的扰动时 PSS 必须正常工作。如图 6 所示, 该文研究的基于 SVC 的 PSS 采用常见的领先滞后结构, 每个结构由增益 K_s 和 2 个或 3 个领先滞后级补偿块组成, 选择时间常数 $T1 \sim T6$ 以提供输入信号的相位引线, 相位补偿块提供适当的相位引线特性。PSS 可以通过控制同步电机的励磁来增加转子振荡的阻尼, 从而抑制电力系统扰动而引起的机电振荡^[18]。

PSS 的运行结果中, 速度偏差峰值为 0.55 rad/s, 稳定时间为 10 s, 如图 7 所示。

采用不同控制策略下对电力系统振荡的抑制效果如表 2 所示。可以看出在机械功率输入偏差为 10% 的情况下, SVC-POD 控制器对单机无穷大系统中的振荡抑制效果更为理想。

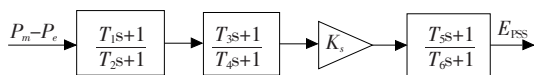


图 6 PSS 的结构

Figure 6 The structure of PSS

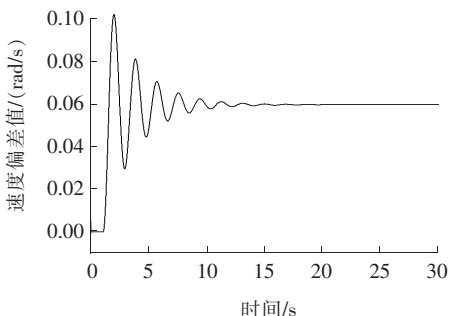


图 7 PSS 控制器仿真结果

Figure 7 Simulation results of PSS controller

表2 不同控制器下仿真结果的比较

Table 2 Comparison of simulation results under different controllers

控制器	速度偏差峰值 rad/s	振荡次数/ 次	恢复稳定时间/ s
PSS	0.102	6	13
SVC-POD	0.073	3	11

4.2 电磁功率变化时的稳定分析

仿真模型:

① 电磁扰动 $P_e=0.2$ p. u., 加 SVC-POD 控制器时系统振荡情况。

② 电磁扰动 $P_e=0.2$ p. u., 加 PSS 控制器时系统振荡情况。

4.2.1 SVC-POD 控制器时域仿真结果

在 SVC 接入位置电磁功率输入偏差为 20% 的情况下, SVC-POD 控制器对修正的海佛容—飞利浦模型的振荡抑制效果进行验证。结果表明, 随着电磁功率扰动的增加 ($P_e=0.2$ p. u.), 系统振荡加剧, 但仍可以很快地保持稳定。如图 8 所示的响应表明了 SVC-POD 控制器的性能, 稳定时间约为 10 s。

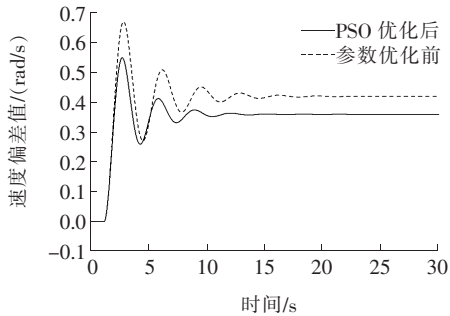


图8 SVC-POD 控制器仿真结果

Figure 8 Simulation results of SVC-POD controller

4.2.2 与传统 PSS 控制的对比分析

如图 9 所示结果表明, PSS 的运行结果中速度偏差峰值为 0.99 rad/s, 稳定时间为 12 s。

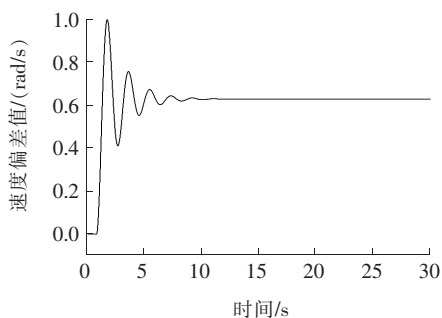


图9 PSS 控制器仿真结果

Figure 9 Simulation results of PSS controller

采用不同控制器下对电力系统振荡的抑制效果如表 3 所示。可以看出在电磁功率输入偏差为 20% 的情况下, SVC-POD 控制器对单机无穷大系统中的振荡抑制效果仍较为理想。

表3 不同控制器下仿真结果的比较

Table 3 Comparison of simulation results under different controllers

控制器	速度偏差峰值 rad/s	振荡次数/ 次	恢复稳定时间/ s
PSS	0.99	5	12
SVC-POD	0.55	3	10

5 结语

该文在线性化海佛容—飞利浦模型的基础上, 推导加入 SVC 参与的低频振荡模型。提出了一种基于 SVC 的电力系统振荡阻尼控制器的系统设计方法。对控制器的主要参数采用 PSO 算法进行优化选择。该文利用 MATLAB/Simulink 对提出的方法进行仿真验证, 对机械扰动及电磁功率增加条件下单机无穷大母线的稳定性进行详细分析, 利用时域分析验证各种控制器的性能。研究表明, SVC-POD 控制器的调节效果与传统的 PSS 控制器相比, 对 0.3 Hz 以下的低频振荡有更加显著的抑制效果。

参考文献:

- [1] 郭思源, 李理, 李振文, 等. 电力系统稳定器 PSS4B 参数优化的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 107-113.
GUO Siyuan, LI Li, LI Zhenwen, et al. Research on the PSS4B parameters optimization of power system stabilizer [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 107-113.
- [2] 金贻涛, 杨军, 吴赋章, 等. 基于 PSASP 和 MATLAB 联合仿真的 PSS 参数整定研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(10): 71-77+102.
JIN Yitao, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Study on PSS parameter tuning based on PSASP and MATLAB co-simulation [J]. Smart Power, 2018, 46(10): 71-77+102.
- [3] 王官宏, 李莹, 余耀, 等. 提高集中电源外送系统输电能力的发电机励磁系统协调优化[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 105-111.

- WANG Guanhong, LI Ying, YU Yao, et al. Coordinated optimization of generator excitation system for improving transmission capacity of power system[J]. *Electric Power*, 2019, 52(8): 105-111.
- [4] 李兰芳. 输电系统 SVC 电压调节器增益自适应控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(3): 61-66.
LI Lanfang. Gain adaptive control method of the voltage regulator for SVC in transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(3): 61-66.
- [5] Somsai K, Oonsivilai A, Srikaew A, et al. Optimal PI controller design and simulation of a static var compensator using MATLAB's SIMULINK[C]// 7th WSEAS International Conference on Power Systems, Beijing, China; WSEAS, 2007.
- [6] Noroozian M, Adersson G. Damping of power system oscillation by use of controllable component[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, 9(4): 2046-2054.
- [7] 马幼捷, 陈寿孙, 张宝霖. SVC 非线性控制对改善电力系统稳定的研究[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1994, 34(4): 1-8.
MA Youjie, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. A study on nonlinear SVC control for improving power system stability[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1994, 34(4): 1-8.
- [8] 唐文强. 基于储能的孤立直流微电网稳压控制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [9] 王岩. 串联混合动力客车控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [10] 栾会. 基于电网动态等值的 PSS 参数优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [11] 王孝康. 永磁偏置混合式磁悬浮轴承结构与控制系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- [12] 张建超. 大规模风电接入下的电力系统小干扰稳定性分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [13] 李娟, 赵磊. SSSC 阻尼系统功率振荡的控制器设计[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(13): 93-96+128.
LI Juan, ZHAO Lei. Design of SSSC auxiliary controller for damping system power oscillation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(13): 93-96+128.
- [14] 张彦魁, 张焰, 吴蓓, 等. 静止无功补偿器建模及其在电压稳定研究中的应用[J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(3): 488-491+496.
ZHANG Yankui, ZHANG Yan, WU bei, et al. The modeling of static var compensator and its application in voltage stability analysis of power systems[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(3): 488-491+496.
- [15] 吕锋, 张健. 基于 PSO 的 SVC 附加阻尼控制器参数优化设计[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2016, 37(2): 11-15+49.
LYU Feng, ZHANG Jian. Parameter optimization design of PSO-based SVC additional damping controller[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2016, 37(2): 11-15+49.
- [16] 刘剑, 黄小庆, 曹一家, 等. 三相 SVC 在电气化铁路电能质量治理中的应用[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(6): 22-28.
LIU Jian, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Application of three-phase SVC in power quality management for electrified railway[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2011, 23(06): 22-28.
- [17] 靳静. 大功率电力电子设备在风力发电系统中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [18] 张建超. 大规模风电接入下的电力系统小干扰稳定性分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.