

DOI: 10.7667/PSPC161399

输电系统 SVC 电压调节器增益自适应控制方法

李兰芳^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 中电普瑞科技有限公司, 北京 102200)

摘要: 静止无功补偿装置(State Var Compensator, SVC)电压调节器的增益影响其响应速度和稳定性。在详细调研国内外输电系统 SVC 应用背景和技术路线基础上, 重点研究了输电系统复杂变化对 SVC 电压调节器的影响, 分析和总结了适用于输电系统 SVC 电压调节器增益控制方法, 提出一种基于闭环积分控制的增益自适应控制方法。增益自适应控制能够在系统运行方式变化或电压调节器输出持续振荡时对电压调节器的增益进行适当调整。通过 RTDS 仿真试验验证了该方法的有效性。该方法具有便于实现、快速抑制振荡、优化增益改善动态响应特性及适用范围广等优越性。

关键词: 电压调节器; 增益自适应控制; 次同步振荡; 振荡检测; 稳定监视

Gain adaptive control method of the voltage regulator for SVC in transmission system

LI Lanfang^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
2. China EPRI Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: The gain of the Static Var Compensator (SVC) voltage regulator affects its response speed and stability. According to the detailed investigation on the application background and technical route of the transmission system SVC, this paper mainly researches the influence on the SVC voltage regulator due to the changes of complex transmission system, analyzes and summarizes the gain control method of SVC voltage regulator used in transmission system, and puts forward a kind of adaptive gain control method based on integral closed loop control. The gain adaptive control can adjust the gain of the voltage regulator properly when the system operation mode is changed or the voltage regulator output continues to surge. The method is proved to be correct through the RTDS simulation. The method has the following advantages: convenient to realize, fast inhibitory oscillation, gain optimizer to improve the dynamic response characteristics and wide range of application.

Key words: voltage regulator; gain adaptive control; sub synchronous oscillation; oscillation detection; stability monitoring

0 引言

我国随着电网规模的扩大和运行环境的日益复杂, 在骨干电网的改造、特高压电网的建设中, 为提高电网安全、稳定和经济运行水平, 受端系统应有足够的无功储备, 尤其是当受端系统存在电压稳定问题时, 需要在受端系统的枢纽变电站配置动态无功补偿设备^[1]。

静止无功补偿(State Var Compensator, SVC)装置在高压输电系统中具备改善电压控制、提高系统的静态和暂态稳定性、增加输电能力、阻尼系统振荡、降低工频过电压等功能。SVC 装置在国内外输电系统中具有重要意义和广阔应用前景。

我国东北电网 220 kV 枢纽变电站鞍山红一变 SVC 采用多目标、多反馈协调控制方式, 兼顾阻尼低频振荡及抑制次同步振荡的能力。川渝电网和藏中电网在电网枢纽点应用多套 SVC 来改善电压控制, 稳态调压可实现全站无功设备的协调控制, 同时具备暂态强补、阻尼低频振荡和抑制次同步振荡的能力。

加拿大魁北克 735 kV 输电工程在末端和中间站安装 SVC 装置, 采用快速电压调节器控制, 提高系统静态和暂态稳定性, 增加输电能力。纳米比亚 400 kV Auas 变电站安装 ABB 公司 SVC 用于抑制系统暂时过电压, 采用电压调节器作为控制主体, 同时具备斜率控制、阻尼控制、过压及欠压控制等功能。

国外 SVC 在输电系统中的应用相对国内较为成熟。国产 SVC 装置走向国际市场需要充分考虑国外输电系统应用背景。设计输电系统 SVC 装置电压调节器时需要着重考虑输电系统的复杂性,例如系统短路水平的复杂变化、系统扰动对 SVC 控制的影响、电气距离较近的 SVC 之间的相互影响、次同步振荡等等。

本文在详细调研国内外输电系统 SVC 应用背景和技术路线基础上,重点研究了输电系统复杂变化对 SVC 电压调节器的影响,分析和总结了电压调节器增益控制方法,提出一种适用于输电系统 SVC 电压调节器的增益自适应控制方法,通过 RTDS 仿真试验验证了该方法的有效性。

1 电压调节器基本设计

输电系统 SVC 电压调节器的主体是一个带斜率控制的 PI 电压调节器,逻辑框图如图 1 所示。其中增益自适应控制将根据系统短路水平变化自动调整电压调节器的增益。在控制中同时附加了功率振荡阻尼控制(POD 控制)和无功控制。此外还包括欠压策略、二次过电压限制和 TCR 过电流限制等保护性控制。

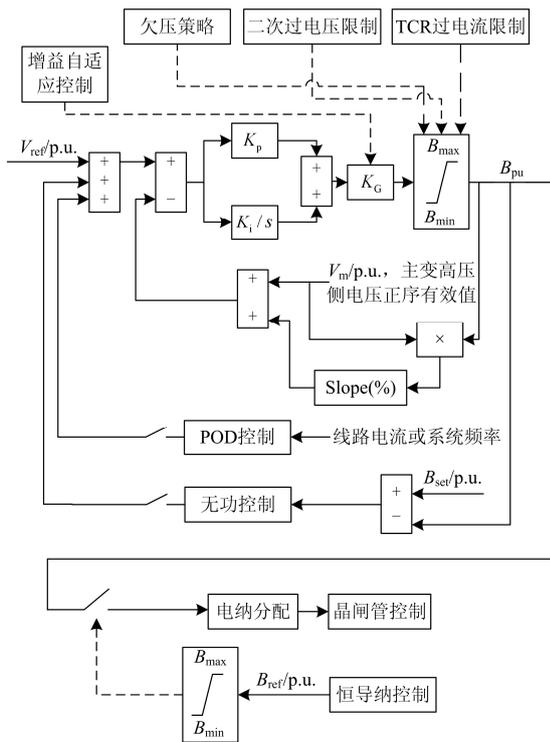


图 1 输电系统 SVC 电压调节器逻辑框图

Fig. 1 Logic block diagram of SVC voltage regulator in power transmission system

电压调节器计算得到的 B_{pu} 即为 SVC 高压侧净电纳值,需要根据变压器额定容量和漏抗进行折算,以得到二次侧 SVC 等效电纳标幺值,经过电纳分配后可分别得到 TSC 支路的控制输出信号和 TCR 支路的触发角控制信号。

功率振荡阻尼(POD)控制以线路的有功功率作为输入信号,用隔直环节消除线路潮流偏差信号中的平均分量,产生一个与线路潮流振荡分量成正比的信号,并经过适当移相后的输出作为电压参考值的附加分量。

无功控制是一个慢速的无功控制电纳调节器,用来改变电压参考值从而使 SVC 的无功输出功率返回到预先设定的值。

欠压策略是指在严重低电压情况下,控制器闭锁 SVC。避免电压调节器使 SVC 在低电压下输出最大容性无功导致故障切除时产生严重过电压。

为了确保 SVC 降压变二次侧电压在 SVC 输出处于高容性时不超过设计的极限值,配备了二次侧过电压限制功能。

TCR 过电流限制功能是为了在系统高电压期间(例如系统甩负荷)限制 TCR 的电流以防止损坏晶闸管和电抗器。

2 增益自适应控制的必要性

输电系统 SVC 装置电压调节器需要着重考虑输电系统的复杂性,例如系统短路水平的复杂变化、各类系统扰动对 SVC 的影响、电气距离较近的 SVC 之间的相互影响,次同步振荡等问题^[2-4]。

将电压调节器的主体部分等效为 $K_G \times (K_p + K_i/s)$, 其中: K_G 为电压调节器的增益; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。

电压调节器增益 K_G 可由式(1)得到。

$$K_G = \frac{S_{kmin}}{Q_{SVC}} \quad (1)$$

式中: Q_{SVC} 为 SVC 额定功率(感性加容性), Mvar; S_{kmin} 为最小短路容量, MVA。

可见,电压调节器增益与电网结构、系统运行方式及投切线路等任何改变 SVC 母线短路水平的事件密切相关。

如果电压调节器的增益是固定不变的,当系统短路水平发生变化后, SVC 响应时间会显著增加,控制回路可能会出现振荡甚至失稳。

如果电压调节器增益选取偏高,即使电压调节器在系统处于静态稳定时能工作正常,但一旦当系

统发生大的扰动(如短路故障)就极有可能引起控制振荡。

如果电压调节器增益选取偏低, SVC 调节响应特性不够理想, 动态响应时间过慢, 影响了 SVC 的调节效果。

当输电系统中存在多个 SVC 或其他 FACTS 设备, 如果交流系统的短路容量很高, 各控制器相互影响较小, 如果交流系统短路水平较低, SVC 之间或 SVC 与其他 FACTS 设备间可能存在很强的相互作用^[5]。

当控制系统不正常或控制参数不合理时, SVC 的电压调节器可能会引起次同步振荡, 引起系统电压波动甚至失稳^[6-7]。

综上所述, 输电系统 SVC 电压调节器的增益不能是固定不变的, 必须考虑输电系统短路水平变化范围大的实际情况。增益自适应控制就是为了监视增益是否合理并实时优化增益值的一种控制手段。增益自适应控制能够在系统运行方式变化或电压调节器输出持续振荡时对电压调节器的增益进行适当调整。

3 一种基于闭环积分控制的增益自适应控制方法

在设计输电系统 SVC 电压调节器增益控制时, 国际上一般采取的方法是: 通过 SVC 注入一个小的无功阶跃, 测量无功变化值和电压变化值, 由此估算公共连接点的短路容量, 进而计算和调整电压调节器增益值^[8-10]。

电网的短路容量可以用式(2)来估算。

$$S_k \approx \frac{\Delta Q_{SVC}}{\Delta V_{PCC}} \cdot V_{PCCN} \quad (2)$$

式中: S_k 为电网的短路容量, 单位为 MVA; ΔQ_{SVC} 为 SVC 无功功率的变化量, 单位为 Mvar; ΔV_{PCC} 为公共连接到电压的变化量, 单位为 kV; V_{PCCN} 为公共连接点母线电压标称值, 单位为 kV。

控制系统发出电纳变化的指令, 使 SVC 在系统中注入一个适当的无功阶跃, 并根据式(2)由公共连接点电压的变化以及 SVC 无功输出变化来估算公共连接点的短路容量, 然后根据式(1)计算得到的短路容量来优化电压调节器的增益。

上述方法存在以下不足:

1) 需要通过干预 SVC 的正常无功输出来测量短路容量。

2) 如果在较近的电气区域内有多个 SVC, 各 SVC 间的电压控制将会相互影响。为了准确测量短

路容量, 需要在各 SVC 之间建立通信连接, 以协调各 SVC 的增益控制。

为了解决上述不足, 本文研究了一种基于闭环积分控制的增益自适应控制方法。该方法既可避免干预 SVC 的正常调节, 又可解决无需建立通信连接就实现多个 SVC 之间的协调控制问题。

基于闭环积分控制的增益自适应控制方法原理框图如图 2 所示。增益自适应控制将连续监视电压调节器的输出, 看是否存在任何持续的增幅振荡, 在系统强度降低而调节器仍然运行在高增益时会发生这种增幅振荡。如果检测到了电压调节器输出的增幅振荡, 就会不断减小增益直到振荡消失。这样不仅可以保护控制回路和功率系统, 同时可以避免由于电网短路容量变化、系统扰动或不合理的调节参数所导致的控制器不稳定输出。

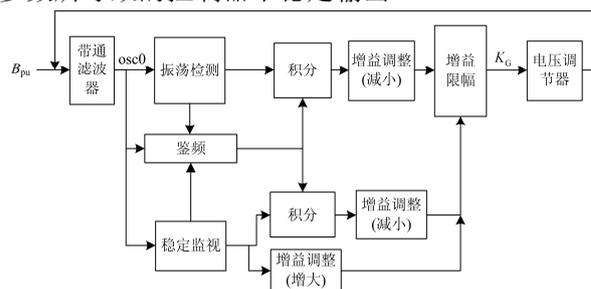


图 2 基于闭环积分控制的增益自适应控制方法

Fig. 2 Gain adaptive control method based on closed loop integral control

增益自适应控制环节主要包括带通滤波器、振荡检测、稳定监视、鉴频、积分、增益调整、增益限幅等单元。各单元具体说明如下。

1) 带通滤波器

带通滤波器用于对电压调节器输出的 B_{pu} 进行滤波处理, 提取控制器不稳定模式下频率范围内的信号。这样增益自适应控制就只响应控制器的不稳定频率, 而不会对其他系统失稳作出响应^[11-12]。

2) 振荡检测

振荡检测将滤波后的电压调节器输出与预先设定的一个阈值进行比较, 并产生一个脉冲, 其宽度等于输入信号幅值超过阈值所对应的时间。预先设定的检测阈值决定了振荡监视的灵敏度。

振荡检测将一直监视电压调节器输出是否存在振荡, 当滤波后的信号 $osc0$ 超过阈值并持续一定时间没有消失表示检测到振荡, 当 $osc0$ 低于阈值并持续一定时间一直低于阈值表示振荡已经消失。

3) 鉴频

增益自适应控制应检测电压调节器输出存在

的振荡,但同时需要避免影响 SVC 对系统低频振荡的阻尼作用。区分电力系统振荡和电压调节器振荡可通过测量电压调节器输出振荡的频率来实现。当振荡频率超过 10 Hz 时增益控制才起作用。

当振荡检测单元检测到振荡,鉴频单元将通过过零积分的方法计算信号 *osc0* 过零点间的周期时间,并由此判断振荡频率是否在 10 Hz 以上。

当振荡检测单元检测到振荡消失后,鉴频单元将被禁用。

4) 稳定监视

稳定监视单元工作原理和振荡检测单元类似,但其监视门槛值更低,具有较高的灵敏度。实时监视电压调节器输出是否满足稳定性的要求。如果电压调节器输出稳定,根据闭环积分的结果,增益在允许范围内被适当增大。如果电压调节器输出出现微小的波动,增益在允许范围内被适当减小。最终增益被控制在当前短路水平下的合理范围内。

5) 积分

增益自适应控制包括两个积分单元,分别用于振荡时的增益调整和维持稳定时的增益调整,都是通过闭环积分控制来实现增益的调整,二者的区别是用于检测振荡和监视稳定度的门槛值灵敏度有所不同。

积分单元在过零点被复位,计算脉冲信号过零点间的时间积分,该值反映了振荡的强弱,并以此产生控制信号进行适量的增益调整。

6) 增益调整

当振荡检测单元检测到振荡后,根据闭环积分结果快速降低电压调节器的增益,有效抑制振荡。

当稳定监视单元监视到电压调节器输出稳定时,增益适量增加。直至到达稳定度临界,增益值被控制在合理水平上。

7) 增益限幅

增益调整后的结果将通过限幅环节,得到最终的增益优化结果,用于电压调节器的控制。

整个增益自适应过程的核心是利用闭环积分反馈思想,合理地抑制振荡,并将增益值优化为当前短路水平下的合理范围内。

4 仿真研究

为了验证本文提出的增益自适应控制方法是否合理有效,进行了 RTDS 实时数字仿真试验。RTDS 试验平台是由加拿大实时数字仿真技术公司研究开发的,是应用最为广泛的电力系统实时仿真工具^[13-15]。在 RTDS 试验平台中模拟了一个应用于 500 kV 输电系统的 SVC 装置。SVC 控制系统采用

中电普瑞科技有限公司制造的安普平台,具有强大的硬件和软件功能。SVC 电压调节器的原理图如图 1 所示。

500 kV 输电系统模型以巴西 PARANATINGA 实际电网等值模型为参考搭建。PARANATINGA 站安装一套-200~200 Mvar SVC 装置。RTDS 仿真系统将模拟电气信号输出给功率放大器(电流/电压放大器),再由功率放大器将信号放大后输出给 SVC 控制系统。控制系统输出 SVC 阀触发信号给 RTDS,形成闭环测试系统。RTDS 仿真试验中,通过切除不同的输电线路来改变 SVC 公共连接点处的短路容量。

分别从振荡监视、稳定度监视、增益优化等方面对该方法进行了充分的验证^[16-18]。

1) 振荡监视及增益优化试验

在试验过程中通过改变系统阻抗来使系统短路容量突变,如果不改变 SVC 电压调节器的增益,短路容量的突然降低将会引起控制振荡。检验是否可以有效地监视振荡的产生和消失,增益是否可快速调整。

图 3 中,当系统短路容量从 8000 MVA 突变为 2000 MVA,原有增益过大引起一定程度的振荡。图 4 中,SVC 控制器检测到振荡后将增益快速降低,大约 400 ms 后振荡被完全抑制住,系统又重新恢复为稳定状态。

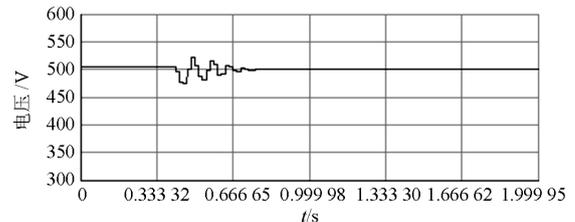


图 3 500 kV 电压有效值曲线

Fig. 3 500 kV voltage effective value curve

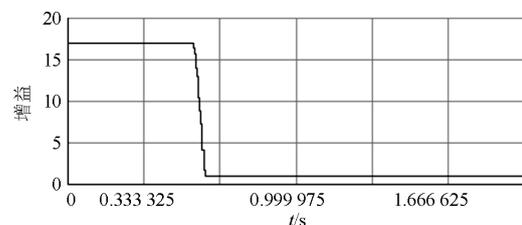


图 4 电压调节器增益曲线

Fig. 4 Voltage regulator gain curve

上述试验结果表明,当系统短路容量突然降低时,不合理的增益将引起控制振荡。本文提出的增益自适应控制方法可以有效地检测到振荡,并快速调整增益,有效地抑制了振荡。

2) 稳定监视及增益优化试验

振荡消失后, 在稳定监视和闭环积分的作用下, 增益将被逐渐优化至一个新的合理值, 以使 SVC 在当前新的短路水平下有较好的动态响应特性。

该类试验按照表 1 进行了不同短路水平测试。对应的增益曲线如图 5 所示。

表 1 不同短路水平的增益优化试验

试验项目	增益自适应控制结果
短路容量为 2000 MVA	增益被优化在 2 左右, 电压稳定
短路容量变为 5000 MVA	增益被优化在 11 左右, 电压稳定
短路容量变为 8000 MVA	增益被优化在 16 左右, 电压稳定

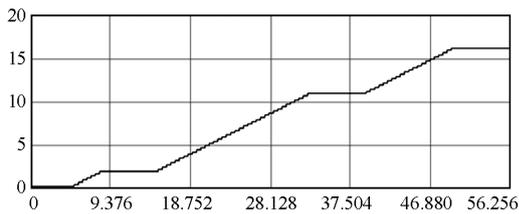


图 5 短路容量变化时增益优化结果

Fig. 5 Gain optimization results when short circuit capacity changes

在前面试验中, 当短路容量从 8000 MVA 突然降低为 2000 MVA 时, 增益自适应控制通过快速调整降低增益来抑制振荡。当短路容量继续保持在 2000 MVA 时, 振荡消失后, 增益被优化为一个比较小的值, 系统电压保持稳定。随着短路容量逐渐增加, 增益值也不断被调整增加。直至系统短路容量重新恢复为最初的 8000 MVA, 增益值也被优化为最初的初始值。

5 结论

上述分析和试验表明, 本文设计的增益自适应控制方法具有以下优越性。

1) 不需要干预 SVC 的正常调节, 不需要进行短路容量的估算, 采取闭环积分的方法来实现增益的优化。

2) 应用于输电系统多套 SVC 时, 不需要各 SVC 控制之间进行通信, 可以灵活便利地适用于多套 SVC 的增益控制。

3) 可以有效地监视控制振荡, 并迅速降低增益, 有效抑制控制振荡, 使系统恢复稳定。

4) 能够自适应地跟踪系统短路容量变化, 自动将增益优化为适应当前短路水平的值, 确保系统稳定且 SVC 具有良好的动态响应特性。

本文提出的基于闭环积分控制的增益自适应

控制方法应用于输电系统 SVC 电压调节器的增益控制, 具有便于实现、有效抑制振荡和优化动态响应特性等优越性。

参考文献

- [1] 林海雪. 静止无功补偿装置在输电系统中的应用[J]. 电力设备, 2005, 6(10): 17-20.
LIN Haixue. Application of static var compensator in transmission system[J]. Power Equipment, 2005, 6(10): 17-20.
- [2] 顾威, 李兴源, 陈建国. 基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 107-111.
GU Wei, LI Xingyuan, CHEN Jianguo. An additional control design for SVC suppression of sub synchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 107-111.
- [3] 冯双, 蒋平, 吴熙. 抑制共振机理低频振荡的 PSS 设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 1-6.
FENG Shuang, JIANG Ping, WU Xi. Design method for low frequency oscillation of resonance mechanism PSS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 1-6.
- [4] 王振浩, 李洋, 高凯. 引入故障恢复信号的 VSC-HVDC 附加阻尼控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 34-40.
WANG Zhenhao, LI Yang, GAO Kai. Study on the VSC-HVDC additional damping control of the fault recovery signal[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 34-40.
- [5] MATHUR R M, VARMA R K Z. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 李建设, 陈磊, 陈亦平. 基于振荡能量消耗的 HVDC 和 SVC 附加阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 9-15.
LI Jianshe, CHEN Lei, CHEN Yiping. Supplementary damping control of HVDC and SVC based on oscillation energy dissipation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 9-15.
- [7] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] DICKMANDER D, THORVALDSSON B, STROMBERG G, et al. Control system design and performance verification for the chester, maine static var compensator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1492-1503.
- [9] SYBILLE G, GIROUX P, DELLWO S, et al. Simulator and field testing of Forbes SVS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1507-1514.

- [10] REED G F, LARSSON D, RASMUSSEN J, et al. Advanced control methods and strategies for the oncor electric delivery renner SVC[C] // Power Systems Conference & Exposition, March 20-23, 2011, Phoenix USA: 1-9.
- [11] 邓伟, 田正文. 利用 MATLAB 辅助设计 IIR 数字带通滤波器[J]. 计算机与数字工程, 2009, 37(6): 153-166.
DENG Wei, TIAN Zhengwen. Using MATLAB to design IIR digital band-pass filter[J]. Computer and Digital Engineering, 2009, 37(6): 153-166.
- [12] 王永山, 石晓梅, 赵立臻. FIR 数字带通滤波器的 MATLAB 设计与 DSP 实现[J]. 车辆与动力技术, 2010, 3(6): 45-48.
WANG Yongshan, SHI Xiaomei, ZHAO Lizhen. MATLAB design and DSP implementation of FIR digital bandpass filter[J]. Vehicle and Power Technology, 2010, 3(6): 45-48.
- [13] 高本锋, 肖湘宁, 赵成勇. 基于实时数字仿真器的 SVC 抑制次同步振荡的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 6-10.
GAO Benfeng, XIAO Xiangning, ZHAO Chengyong. Research on SVC based on the real time digital simulator to suppress subsynchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 6-10.
- [14] XIAO Xiangning, ZHAO Yang, ZHANG Yan, et al. Closed loop test platform for SVC controller based on RTDS[C] // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, October 17-20, 2008, Wuhan, China: 2169-2172.
- [15] 缪勇, 王伟岸. 用于 SVC 控制系统闭环测试的 RTDS 建模[J]. 上海电气技术, 2010, 3(3): 6-10.
MIU Yong, WANG Weian. RTDS modeling for closed loop testing of SVC control system[J]. Shanghai Electric Technology, 2010, 3(3): 6-10.
- [16] 岑炳成, 刘涤尘, 董飞飞, 等. 抑制次同步振荡的 SVC 非线性控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 129-135.
CEN Bingcheng, LIU Dichen, DONG Feifei, et al. Nonlinear control method of static var compensator for damping subsynchronous oscillation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 129-135.
- [17] 罗超, 肖湘宁, 张剑, 等. 并联型有源次同步振荡抑制器阻尼控制策略优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 150-158.
LUO Chao, XIAO Xiangning, ZHANG Jian, et al. Optimal design of damping control strategy for parallel active subsynchronous oscillation suppressor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 150-158.
- [18] 徐海亮, 廖自力, 贺益康. 基于旋转坐标变换的实系数与复系数 PI 调节器性能比较[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 171-176.
XU Hailiang, LIAO Zili, HE Yikang. Characteristic comparison of the real- and complex-coefficient PI regulators based on coordinate rotating transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 171-176.

收稿日期: 2016-08-29; 修回日期: 2017-01-22

作者简介:

李兰芳(1978—), 女, 博士研究生, 工程师, 研究方向为灵活交流输电。E-mail: lilanfang78@126.com

(编辑 周金梅)