

基于内模控制的 SSSC 前馈解耦控制策略研究

曾 舒 张花芝 辜 俊 丁颖萍

(国网江西省电力公司抚州供电分公司 江西 抚州 344000)

摘 要: 根据内模控制原理和解耦控制策略,研究了基于内模解耦控制的 SSSC 控制器,由于 SSSC 的 $d-q$ 电流、 $d-q$ 电压都存在着交叉耦合,解耦控制可以实现对 $d-q$ 电流和 $d-q$ 电压的成功解耦。基于内模原理设计的控制器其设计原理简单,控制器参数整定比较容易,物理概念清晰,容易实现,而且能够达到良好的效果,最后详细设计并搭建了 SSSC 在不同工作方式下的仿真模型,经过实验仿真验证了这种控制方法的良好性。

关键词: SSSC; 前馈解耦; 内模控制

Abstract: According to internal model control theory and decoupling control strategy, the controller of static synchronous series compensator (SSSC) is developed based on internal model decoupling control. Because both of dq currents and dq voltage exist cross coupling, decoupling control can successfully decouple dq currents and dq voltage. The design principle of the proposed controller based on internal model control is simple, the tuning of its parameters is easier and the physical concept is clear, so it can achieve good results. In the end, the simulation models of SSSC are designed in detail and established under different operating modes. This control method is verified to be very good by the simulation.

Key words: static synchronous series compensator; feed-forward decoupling; internal model control

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)05-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.05.012

0 引 言

随着电力系统向大规模电网互联的方向发展,电力系统变得越来越复杂。如此庞大的非线性系统的参数往往也是不固定的,致使大规模电网的运行和维护都比较麻烦。多年来很多学者和科学家都在寻找保证电力系统安全、稳定运行的方法,近几年主要集中在对 FACTS 技术的研究;而 FACTS 技术的核心和关键技术是它的控制策略,目前 PI 控制器^[1-2]是实际中应用最广泛的,但是 PI 参数跟系统的结构或运行方式有关,系统结构或运行方式的改变都需要重新整定 PI 参数,所以整定较麻烦。而智能控制^[3-5]虽然能够在线对控制器参数进行整定,但它还处于理论研究的层面,实际应用较少,还有待在实践中进行检验。鉴于以上控制策略存在的缺点,应用了一种新的控制策略内模控制对 FACTS 技术中的 SSSC 控制器进行设计,由于它不但具有 PI 的所有优点,还有自身的很多优点,它不过分依赖系统的结构和运行方式,参数整定简单,具有较强的鲁

棒性,而且已在很多领域得到了广泛的应用^[6-7],所以将内模控制应用于 SSSC 控制器的研究具有一定的理论意义和工程应用价值。

1 内模控制原理

图 1 为内模控制器的结构原理图^[8],图中 $P(S)$ 为被控对象, $C(S)$ 为反馈控制器, $M(S)$ 为对象模型, $d(S)$ 为扰动量, $R(S)$ 为参考输入, $Y(S)$ 为系统输出, $N(S)$ 为反馈量,虚线框图中 $Q(S)$ 的为内模控制器。

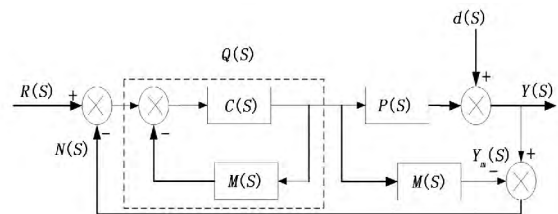


图 1 内模控制器结构框图

由图 1 可以得出下面的关系式:

$$C(S) = Q(S) / [1 - M(S) Q(S)] \quad (1)$$

$$Y(S) = P(S) Q(S) R(S) / [1 + Q(S) (P(S) - M(S))] + [1 - Q(S) M(S)] d(S) / [1 + Q(S) (P(S) - M(S))]$$

$$= P(S) C(S) R(S) / [1 + C(S) P(S)] + d(S) / [1 + C(S) P(S)] \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知:当被控对象与模型匹配(即 $P(S) = M(S)$)时,若选择 $Q(S) = 1/M(S)$ 时,则 $Y(S) = R(S)$,即系统的输出等于输入,不受任何干扰信号的影响,具有较强的鲁棒性;当被控对象与模型不匹配时,反馈信息中包含扰动量和模型失配的某些信息,从而有利于控制系统的抗扰动设计。由于各种原因,在实际工程中很难保证对象模型的准确性;为了解决这种情况而引入了滤波环节(滤波器),其目的是当控制对象与模型失配时使系统保持稳定,若合理选取滤波器的结构和参数,能够有效抑制干扰,增强系统的鲁棒性。

2 SSSC 的控制策略

2.1 SSSC 数学模型的建立及前馈解耦控制

图 2 是 SSSC 的结构原理框图,电压源换流器的直流侧可以采用直流电压或者直流电容,这里采用直流电压。采用直流电压时,SSSC 可以用来调节端电压幅值、相角、线路电抗、线路潮流。

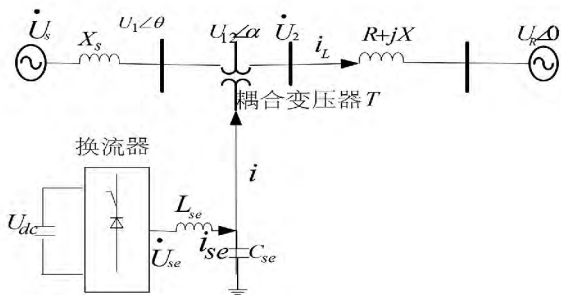


图 2 SSSC 的基本结构原理框图

由图 2 可以列出 SSSC 的数学模型(只列其中一相的):

$$u_{se} = u_{12} - R_{se} \cdot i_{se} - L_{se} di_{se}/dt \quad (3)$$

$$C_{se} du_{12}/dt = i_{se} - i \quad (4)$$

将式(3)、式(4)中的三相数学模型进行 3/2 Park 变换,然后进行拉普拉斯变换得到频域内的系统模型,最后将系统模型进行解耦可得解耦的控制模型和解耦后的控制模型,如图 3 和图 4(d 、 q 轴模型相同)所示。

由图 4 可以看出 d 、 q 轴电压、电流不存在任何的关联,即成功地实现了解耦控制。

2.2 基于内模控制的调节器的设计

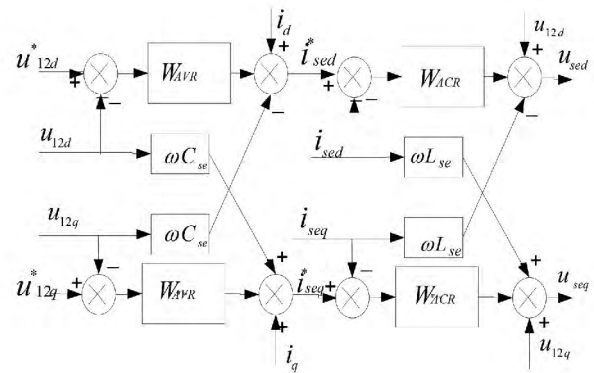


图 3 系统解耦的控制模型

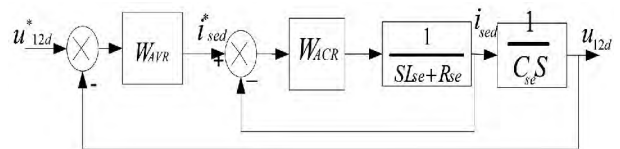


图 4 系统解耦后的控制模型

由于 d 、 q 轴模型相同,所以下面以 d 轴来设计。

2.2.1 电流内环控制器设计

由于实际中换流器存在延时,可用一阶惯性环节来 $T_{PWM}/(T_{PWM}S + 1)$ 等效^[9],则电流内环的被控对象为

$$P_i(S) = \frac{K_{PWM}}{(T_{PWM}S + 1)(SL_{se} + R_{se})} \quad (5)$$

假设被控对象与模型匹配时,即 $M(S) = P_i(S)$,由于 $M(S)$ 为最小相位系统,此时取 $Q(S) = F_i(S)/M(S)$ ($F_i(S)$ 为低通滤波器),低通滤波器取为

$$F_i(S) = \frac{1}{T_{ci}S + 1} \quad (6)$$

此时可得电流反馈控制器为

$$W_{ACR} = C(S) = \frac{(T_{PWM}S + 1)(SL_{se} + R_{se})}{K_{PWM}T_{ci}S} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可以看出内模控制器只有一个调节参数(T_{ci} 滤波器的时间常数),调节起来比较简单容易。

2.2.2 电压外环调节器设计

在控制对象与模型匹配时,将设计好的电流环进行如下的等效,由式(7)和图 4 可以得出:

$$\frac{i_{sed}}{i_{sed}^*} = \frac{1}{T_{ci}S + 1} \quad (8)$$

由式(8)可以看出电流闭环只与滤波器的参数 T_{ci} 有关,而与电流环的被控对象参数(整流器、电机、线路的参数)无关。说明内模控制对被控对象

的参数变化具有较强的鲁棒性。

则电压外环的过程模型为

$$P_V(S) = \frac{1}{C_{se}S(T_{ci}S + 1)} \quad (9)$$

由于对象模型中含有积分环节,为了被控对象与模型相匹配,选取滤波环节

$$F_V(S) = \frac{2T_{cu}S + 1}{(T_{cu}S + 1)^2} \quad (10)$$

则此时可得电压反馈控制器为

$$W_{AVR} = C(S) = \frac{C_{se}(2T_{cu}S + 1)(T_{ci}S + 1)}{T_{cu}^2S} \quad (11)$$

2.2.3 根据不同的控制目标进行控制器设计

1) 端电压幅值调节(即动态电压调节),只补偿母线电压 \dot{U}_1 的幅值,相位不变。设计过程如下:首先通过锁相环得出母线电压 \dot{U}_1 的相位,将其经过三角函数发生器得到三相单位电压,然后乘以电压指令幅值与母线电压 \dot{U}_1 的幅值的差值得到三相串联补偿电压,最后对其进行 dq 变换得到 U_{12d} 、 U_{12q} ,与上述电流、电压解耦控制结合即为完整的端电压调节控制器。控制框图如图 5 所示。

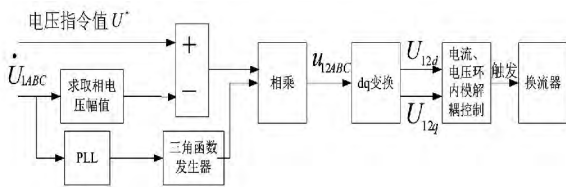


图 5 SSSC 用于调节端电压控制框图

2) 电压相角调节,这种只调节端电压相角但不改变端电压幅值,设计过程如下:首先设定相角指令值,然后将其经过三角函数发生器得到的三相单位电压信号与 \dot{U}_1 的幅值相乘得到三相电压 \dot{U}_2 , \dot{U}_2 减去 \dot{U}_1 得到 \dot{U}_{12} ,将三相电压 \dot{U}_{12} 进行 dq 变换得到 \dot{U}_{12d} 、 \dot{U}_{12q} ,与上述电流、电压解耦控制结合即为完整的移相控制器。控制框图如图 6 所示。

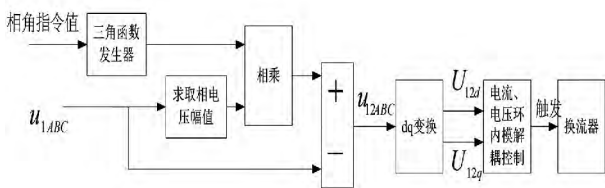


图 6 SSSC 用于调节电压相角控制框图

3) 线路电抗调节,由于 SSSC 注入的电压 \dot{U}_{12} 与线路电流无关,在 SSSC 与线路无有功功率交换时,此时 \dot{U}_{12} 与线路电流相位角相差 $\pm 90^\circ$,可以将其等

效为一串联电抗(容性或感性),从而可以调节线路电抗。控制框图如图 7 所示。

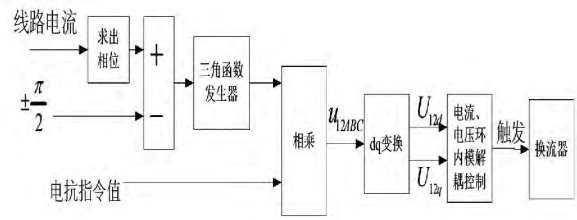


图 7 SSSC 用于调节线路阻抗控制框图

4) 调节线路潮流,由于这里的换流器直流侧使用直流电压源,所以可以用来控制输电线路潮流, U_{12d} 控制无功功率, U_{12q} 控制有功功率。控制结构框图如图 8 所示。

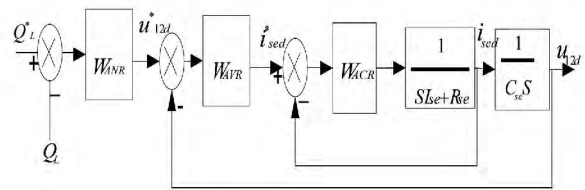


图 8 SSSC 用于调节线路潮流的控制框图

下面根据内模控制整定功率控制器 W_{ANR} 。

上述电压环设计好以后可以等效为

$$\frac{u_{12d}}{u_{12d}^*} = F_V(S) = \frac{2T_{cu}S + 1}{(T_{cu}S + 1)^2}, \text{ 由于 } \frac{Q_L}{u_{12d}} =$$

$\frac{wL}{(LS + R)^2 + (wL)^2}$, 所以功率环的被控对象为

$$P_Q(S) = F_V(S) \frac{wLV}{(LS + R)^2 + (wL)^2} \text{ 选滤波器为}$$

$$F_Q(S) = \frac{3T_{cQ}S + 1}{(T_{cQ}S + 1)^3} \quad (12)$$

则可得功率控制器为

$$W_{ANR} = \frac{(3T_{cQS} + 1)(T_{cu}S + 1)^2 [(LS + R)^2 + (wL)^2]}{wLVT_{cQ}^2S^2(2T_{cu}S + 1)(T_{cQ}S + 3)} \quad (13)$$

3 仿真结果分析

利用 Matlab/Simulink 仿真软件对上述基于内模原理设计的 SSSC 控制器在 4 种工作方式下进行仿真分析,系统模型采用单机无穷大系统,如图 2 所示,仿真系统参数如表 1 所示。

根据第 2 节的基于内模原理的控制器设计方法,可以取控制器参数 $T_{ci} = 0.001$, $T_{cu} = 0.005$, $T_{cQ} = 0.01$ 。下面通过 Bode 图来对控制器的控制效果

表 1 系统参数

参数	数值
首端电压有 \dot{U}_s	$220 \angle 100^\circ$
末端电压 \dot{U}_R	$220 \angle 90^\circ$
电网频率 f / Hz	50
变压器 $T_2 (Y/d1)$ 变比	1:1
首端连接的阻抗 $R_s + j\omega L_s / \Omega$	$(0.2 + j0.5\pi)$
线路阻抗 $R + jX / \Omega$	$(2 + j25\pi)$
换流器等值电阻 R_{se} / Ω	0.01
滤波电感 L_{se} / mH	6
滤波电容 $C_{se} / \mu\text{F}$	66
直流侧电压 U_{dc} / V	600

进行分析,功率环中被控对象 $P_Q(S) = \frac{wLV(2T_{cu}S+1)}{(T_{cu}S+1)^2(LS+R)^2+(wL)^2}$ 、开环传递函数 $P_{Q0}(S) = \frac{3T_{cQ}S+1}{T_{cQ}^2S^2(T_{cQ}S+3)}$ 、闭环传递函数 $P_{Qs}(S) = \frac{3T_{cQ}S+1}{(T_{cQ}S+1)^3}$ 的频率特性如图 9、图 10 和图 11 所示。

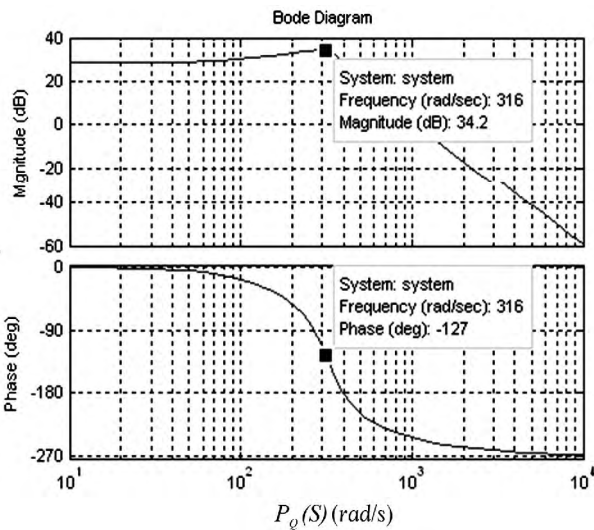


图 9 被控对象 $P_Q(S)$ 的频率特性

从图 9 中可以看到被控对象 $P_Q(S)$ 在频率为 316 rad/s 处发生谐振,谐振峰值为 34.2 dB,而由图 10 和图 11 可见在控制器的作用下开环传递函数 $P_{Q0}(S)$ 和闭环传递函数 $P_{Qs}(S)$ 谐振基本被抑制,闭环传递函数在基频下的幅值为 -11.5 dB。由此可见控制器参数的取值较合适,在此控制器的作用下能够很好地抑制系统的谐振,而且有较快的反应速度。

下面利用 Matlab/Simulink 平台对基于内模控制的 SSSC 在 4 种工作方式下进行实验仿真分析。

图 12 为端电压调节,当系统电压 \dot{U}_1 在 0.2 ~ 0.3 s 突然升高时,为了维持系统的稳定运行,一般

需要对其进行电压负补偿,使电压运行在稳定值附近。由图中可以看到经 SSSC 调节后电压恢复到稳定值,而且相角保持不变,很好地达到了端电压控制的目的。

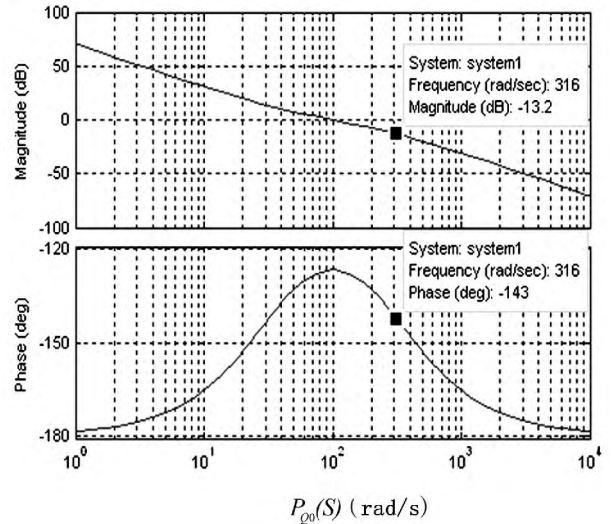


图 10 控制系统开环传递函数 $P_{Q0}(S)$ 的频率特性

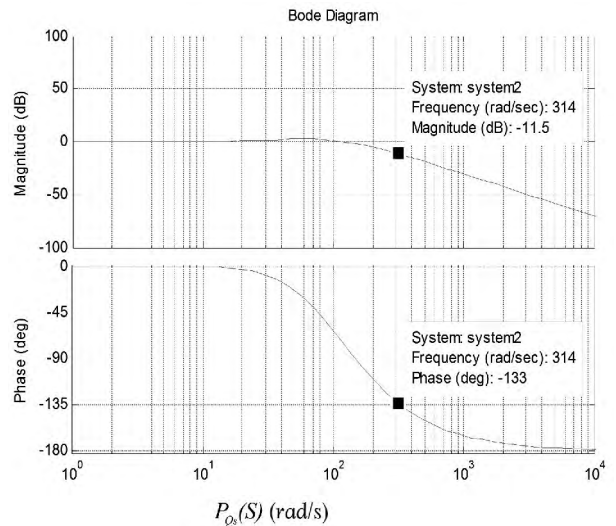


图 11 控制系统闭环 $P_{Qs}(s)$ 的频率特性

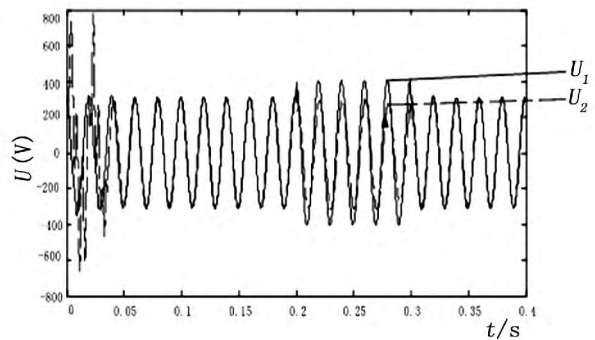


图 12 SSSC 调节端电压突升情况

图 13 为相位调节,指令值(\dot{U}_2 的相角)设定为 15° ,由图中可以看到,在 SSSC 的调节下电压 \dot{U}_2 的

相角跟踪指令值保持不变,而且电压幅值与 \dot{U}_1 的幅值相同,也就是说 SSSC 只调节 \dot{U}_1 的相角,其幅值保持不变。

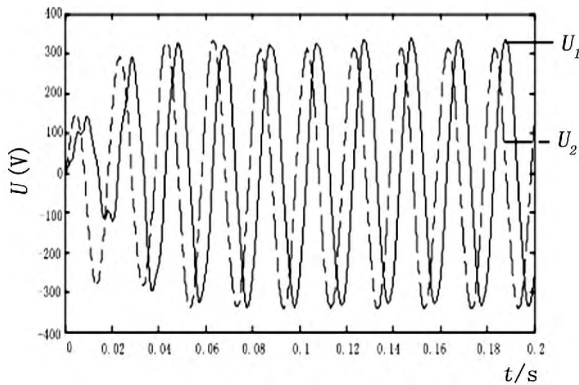


图13 SSSC 用来调节母线的相位

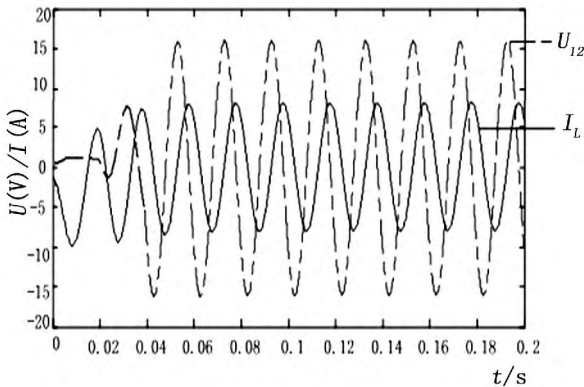


图14 SSSC 用来调节线路电抗

图14为线路电抗调节,指令电抗值设定为 $2\ \Omega$,则 SSSC 等效的串联电压 \dot{U}_{12} 的幅值为线路电流幅值的 2 倍,相角相差 90° 。由图中可知:电压 \dot{U}_{12} 经过两个周期达到期望值,调节非常迅速。

图15、图16是线路潮流调节,由图15、图16可知线路有功(无功)给定值在 0.3 s 由 0 kW(/kvar) 跳变为 5 kW(/kvar) 在 1 s 时由 5 kW(/kvar) 跳变为 -1 kW(/kvar),线路有功(无功)功率分别经过约 0.1 s 和 0.2 s 后准确地跟踪有功(无功)潮流的跳变,快速地实现了线路潮流控制的目的。

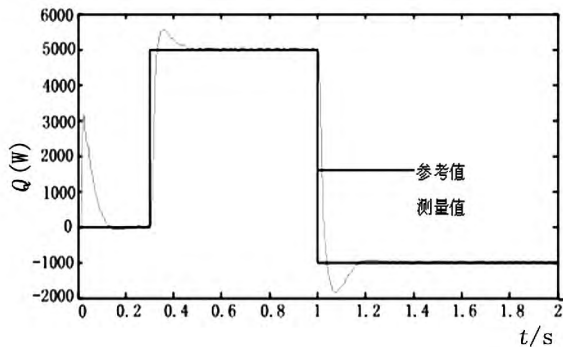


图15 线路有功功率跟踪情况

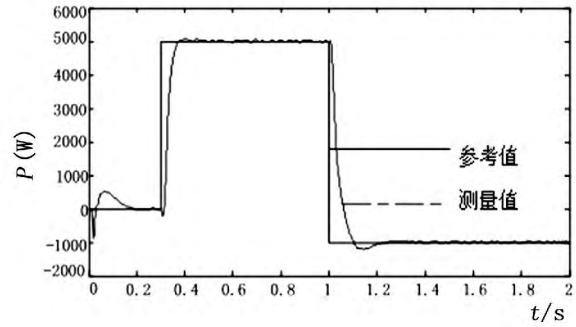


图16 线路无功功率跟踪情况

4 结论

首先利用内模原理设计 SSSC 控制器,通过绘制 Bode 图来分析控制器参数的取值合理。由以上的 SSSC 在不同工作方式下的实验结果表明,基于内模原理设计的控制器具有较强的鲁棒性,能够快速调节系统使其跟踪运行参数期望值,而且内模控制器只有一个调节参数(滤波参数),调节简单,具有很好的跟踪效果。

参考文献

- [1] 黄崇鑫. 统一潮流控制器控制策略的研究[D]. 成都: 西南交通大学 2009: 21 - 24.
- [2] Huang Zhengyu, Ni Yixin, Shen C M, et al. Application of Unified Power flow Controller in Interconnected Power Systems - modeling, Interface: Control Strategy and Case Study [J]. IEEE Trans on Power Systems 2000, 15(2): 817 - 824.
- [3] 王超, 舒乃秋, 吕小静. 统一潮流控制器的模糊控制策略设计[J]. 继电器 2003, 31(10): 13 - 17.
- [4] 黄振宇, 刁勤华, 孙岩, 等. UPFC 的模糊调制控制研究[J]. 电力系统自动化 2000, 24(2): 36 - 41.
- [5] 张爱国, 韩军锋, 蒋程. 基于神经网络自适应 PI 控制的 SSSC 潮流控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 1 - 5.
- [6] 罗霄华. 一阶线性时滞系统的内模控制设计[J]. 山西电子技术 2011(6): 1 - 5.
- [7] 王晓燕. 多变量解耦内模控制在锅炉燃烧系统中的应用研究[D]. 青岛: 青岛科技大学 2008: 26 - 40.
- [8] 齐菲. 多变量内模控制的仿真研究[D]. 北京: 北京化工大学 2008: 7 - 9.
- [9] 朱鹏程. 用于 UPFC 的串、并联双变流器控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学 2005: 104 - 106.

(收稿日期: 2015 - 06 - 23)