

TSC + STATCOM 的混合无功补偿装置 协调控制策略研究

张翔,王奔,冯阳,马明智

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:提出一种由 TSC 和 STATCOM 构成的混合无功补偿装置,兼具 TSC 大容量、低成本和 STATCOM 准确无功补偿的优点。采用分层控制结构,利用专家系统来推理协调二者运行。对 TSC 频繁投切的情况,为避免电容器组投入时的涌流,TSC 采用预充电技术,并于电网电压峰值时刻投入。考虑到 STATCOM 的数学模型为一强耦合、非线性系统,采用逆系统方法对其进行线性化解耦,再用变结构理论进行设计。仿真结果表明,在采用所提控制策略下,该混合无功补偿装置具有良好的补偿效果。

关键词:无功补偿;混合无功补偿装置;专家系统;逆系统;变结构控制

Abstract: A hybrid var compensator which consists of thyristor switched capacitor (TSC) and static synchronous compensator (STATCOM) is proposed. It has the advantages of TSC and STATCOM and can realize low cost, large capacity and accurate reactive compensation. The hierarchical control structure is adopted and the coordinated control of TSC and STATCOM is realized by expert system. In order to avoid inrush current, the pre-charge technology is applied to TSC and the capacitor is put into operation in the system voltage peak. Considering the fact that the mathematical model of STATCOM is a nonlinear coupling system, the inverse system approach is adopted to carry out the decoupling linearization of the original system. Then the variable-structure control is used for its design. The simulation results indicate that the hybrid var compensator has a perfect compensation performance based on the proposed control strategy.

Key words: reactive compensation; hybrid var compensator; expert system; inverse system; variable-structure control

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0034-05

电力系统中,大量无功的远距离传输造成电网损耗增加、各节点电压降低,严重影响电能质量^[1-2]。近年来,随着负荷容量的不断增加,电网对无功的需求越来越大,无功功率的补偿就显得尤为重要。目前,无功补偿装置种类繁多,主要有固定电容器(fixed compensator,FC)、并联饱和电抗器(saturating resistance,SR)、晶闸管控制电抗器(thyristor controlled resistance,TCR)和晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor,TSC)等。而得益于电力电子技术的发展,静止同步无功补偿器(static synchronous compensator,STATCOM)也受到了广泛的关注^[3-4]。

目前,TSC作为一种成本较低、控制简单的无功补偿装置已得到广泛应用,但其只能实现无功的分级补偿,难以满足现代电网对无功补偿技术较准确的要求。而 STATCOM 采用 GTO、IGBT 等全控型电力电子器件,能准确、快速地完成无功的补偿,但由于电力电子制造工艺的限制,大容量的 STATCOM

造价昂贵,这限制了其进一步的发展。故研究一种低成本、快速、大容量的无级无功补偿装置显得非常有必要^[5-7]。

针对 TSC 和 STATCOM 各自的优缺点,提出一种由 TSC 与 STATCOM 构成的混合无功补偿装置,兼具 TSC 低成本、大容量和 STATCOM 准确补偿的优点。TSC 为离散子系统,STATCOM 为连续子系统,所以混合无功补偿装置是由离散子系统和连续子系统构成的混杂系统,其控制是该无功补偿装置的重点。为实现离散子系统 TSC 和连续子系统 STATCOM 的协调控制,在分析其工作原理的基础上,采用分层控制结构。其中,TSC 与传统机械开关投切电容器(mechanical switching capacitor,MSC)不同,采用晶闸管阀代替机械开关,在频繁投切电容器(来不及对电容器残压放电)的情况下,能任意准确控制电网电压值在等于电容器残压时刻投入电容器组,避免了因机械开关动作时间不准确导致电网电压与电容器残压偏差而引起的电容器冲击电流现

象。而针对 STATCOM 数学模型强耦合、非线性的特点,采用基于逆系统的变结构控制方法。最后通过仿真证明,在所提控制策略下,该混合无功补偿装置能实现无功的快速、连续补偿。

1 混合无功补偿装置结构与原理

TSC + STATCOM 的混合无功补偿装置拓扑结构如图 1 所示,主要由一台小容量的 STATCOM 和多组大容量的 TSC 组成。STATCOM 采用电压源型逆变器,直流侧电容器作为储能元件,需保持其电压恒定,逆变器经连接电抗或通过变压器接入系统。STATCOM 能提供较小容量的感性无功和容性无功,实现无功功率的精补,是连续补偿系统。多组 TSC 容量相同,通过晶闸管阀接入系统,与之相串联的电抗器可抑制电容器组投入时所引起的涌流以及以单调谐方式滤除谐波。单组 TSC 容量是 STATCOM 的两倍,实现无功功率的粗补,是离散补偿系统。

为说明两者的协调运行,现假设单组 TSC 容量为 Q_c , STATCOM 容量为 $Q_c/2$ 。当系统所需无功功率介于 $nQ_c - Q_c/2$ 与 $nQ_c + Q_c/2$ 之间时,投入 n 组电容器组,而剩余介于 $-Q_c/2$ 与 $Q_c/2$ 之间的无功功率则由 STATCOM 进行补偿;而当系统所需无功功率超出已投入的 TSC 加上 STATCOM 装置最大补偿容量范围时,则投入新的一组 TSC,同时调节 STATCOM 在适当的值。如此,便可实现降低 STATCOM 成本且满足大容量无功的准确无级补偿。

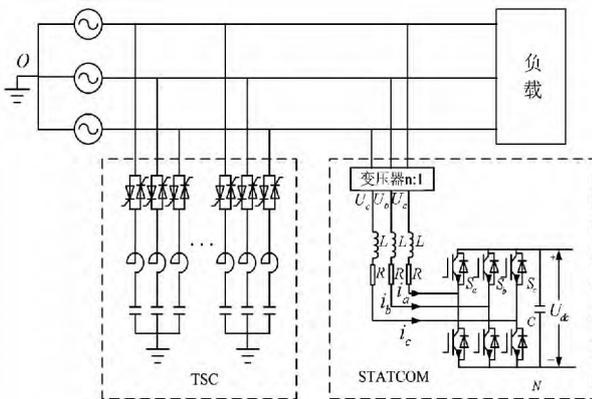


图 1 混合无功补偿装置拓扑图

2 混合无功补偿装置控制器的设计

2.1 概述

TSC + STATCOM 的混合无功补偿装置是由离

散子系统 TSC 和连续子系统 STATCOM 构成的混杂系统。为协调各子系统的控制,保证装置的可靠运行,这里采用三层结构进行控制,即决策层、控制层、执行层,如图 2 所示。决策层根据采样信息,给定补偿无功功率指令值,经专家系统推理,得出投切电容器组数 P 及 STATCOM 补偿无功功率的期望值 Q_{ref}^* ;控制层由 TSC 控制器及 STATCOM 控制器构成,根据决策层的指令,TSC 控制器产生晶闸管阀的开关信号,STATCOM 控制器产生相应的 SPWM 信号;执行层为 TSC 和 STATCOM 的功率驱动元件,接收控制层的信号并驱动 TSC 和 STATCOM,从而实现无功功率的补偿。

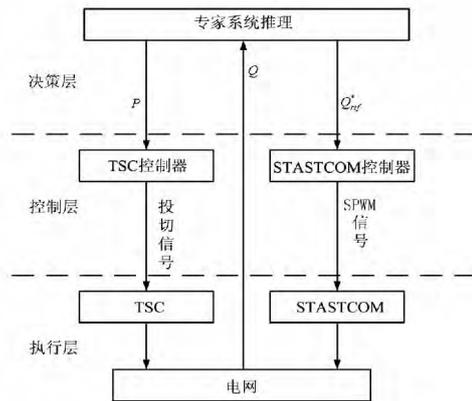


图 2 系统分层控制结构图

2.2 专家系统的设计

专家系统是一个具有专门知识和经验的程序系统,它根据某个领域专家提供的知识和经验进行推理和判断,模拟专家的决策过程,以解决那些需要专家决策的复杂问题^[8,9]。

混合无功补偿装置中设计专家系统的基本思想是:将 TSC 与 STATCOM 协调运行的专家经验用规则表示出来,形成知识库,进而根据采样信息对知识库进行推理,得出 TSC 的投切组数 P 及 STATCOM 补偿无功功率的期望值 Q_{ref}^* 。

假设单组电容器组的容量为 Q_c , STATCOM 的容量为 $Q_c/2$,系统需补偿的无功功率容量为 Q 。总共有电容器组 n 组,现在假设已投 m 组,根据系统负荷变化,应随时投切 P 组,最终通过专家系统推理,以确定 P 的大小和正负以及 STATCOM 无功功率补偿期望值 Q_{ref}^* 。专家判断规则如下。

$$\text{IF } \frac{2(P+m)-1}{2}Q_c \leq Q < \frac{2(P+m)+1}{2}Q_c, \\ \text{THEN } Q_{ref}^* = Q - (P+m)Q_c, m = m + P$$

IF 语句可确定 P 值, THEN 语句确定 m 与 Q_{ref}^* 。其中 P 为正值时, 表示投入电容器组, 其值大小表示投入组数, 此时 $0 \leq P \leq n - m$; P 为负值时, 表示切除电容器组, 其值大小表示切除组数, 此时 $|P| \leq m$; Q_{ref}^* 为正值时, 表示发出感性无功功率, 其值大小表示补偿容量, 此时 $0 \leq Q_{ref}^* \leq Q_c/2$; Q_{ref}^* 为负值时, 表示吸收感性无功功率, 其值大小表示补偿容量, 此时 $|Q_{ref}^*| \leq Q_c/2$ 。

2.3 TSC 控制器的设计

TSC 控制简单, 但需注意到电容器组投入系统, 且电网电压不等于电容器残压时, 极易引起涌流, 而对于 TSC 频繁投切的场合, 更是严重影响电容器组的使用寿命。由于上次电容器组被切除时, 晶闸管在电容器电路电流过零时关断, 则电容器电压必然为电网电压的峰值。所以, 若电容器组电压初值为电网电压峰值, 并于电网电压峰值时刻投入, 则理论上不存在涌流。故在初次投入时, 采用预充电技术, 将电容器组电压充至电网电压峰值, 控制器接收到决策层的投入信号后不立即投入, 待电网电压到达峰值时再发送投入信号至执行层, 可有效避免涌流。之后, 由于频繁投切加之未设置电容器组的放电电路, 切除后的电容器组残压略小于电网电压峰值, 此时若有投入信号, 则待检测到电网电压值等于电容器组残压值时(在电网电压峰值附近时刻), 投入电容器组。这样, 避免了在频繁投切情况下电容器组投入的涌流问题, 延长了电容器组的使用寿命。

2.4 STATCOM 控制器的设计

2.4.1 STATCOM 的数学模型

由图 1 中 STATCOM 的电路结构, 可得出其在 abc 坐标系下的数学模型^[10], 如式(1)所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = U_a - Ri_a - S_a U_{dc} - U_{NO} \\ L \frac{di_b}{dt} = U_b - Ri_b - S_b U_{dc} - U_{NO} \\ L \frac{di_c}{dt} = U_c - Ri_c - S_c U_{dc} - U_{NO} \end{cases} \quad (1)$$

其中 S_i ($i = a, b, c$) 为开关信号函数; U_{NO} 为直流侧电容器低电位点与系统中性点的电位差, 二者数学表达式如下。

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 相上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 相上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad i = a, b, c \quad (2)$$

$$U_{NO} = -\frac{U_{dc}}{3} \sum_{i=a,b,c} S_i \quad (3)$$

为了便于控制器的设计, 将 STATCOM 在 abc 坐标系下的数学模型转换到 dq 坐标系下, 即得

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L} (U_d - RI_d - S_d U_{dc} + L\omega I_q) \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L} (U_q - RI_q - S_q U_{dc} - L\omega I_d) \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2C} (S_d I_d + S_q I_q) \end{cases} \quad (4)$$

式中, 下标 d, q 表示各物理量在 dq 坐标系下的 d 轴和 q 轴分量。

2.4.2 无功电流的计算

STATCOM 控制器从决策层接收到的是无功功率的期望值, 需通过计算得出 STATCOM 无功电流的期望值。由瞬时无功检测理论知^[11], 当 Park 变换矩阵的初相角与母线电压相角相同时, STATCOM 补偿的无功功率与电流存在如下关系。

$$Q_s = \frac{3}{2} U_d I_q \quad (5)$$

2.4.3 逆系统方法线性化解耦

逆系统方法^[12]是近 20 年发展起来的一种新型反馈线性化理论, 其基本思想是: 通过反馈方法求得被控对象的逆系统, 将逆系统串接于原系统之前, 组成新型复合系统。该新型复合系统是具有线性传递关系的伪线性系统。

选取式(4)的状态变量为 $[x_1 \ x_2 \ x_3] = [I_d \ I_q \ U_{dc}]$, 控制输入量为 $[u_1 \ u_2] = [S_d \ S_q]$, 输出变量为 $[y_1 \ y_2] = [I_d \ I_q]$, 并利用逆系统方法求得逆系统为

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{x_3} (U_d - Rx_1 - L\dot{x}_1 + L\omega x_2) \\ u_2 = \frac{1}{x_3} (U_q - Rx_2 - L\dot{x}_2 - L\omega x_1) \end{cases} \quad (6)$$

选取 $v_1 = \dot{y}_1$, $v_2 = \dot{y}_2$ 为逆系统的输入变量, 并将式(6)串接于原系统之前, 构成具有线性关系的伪线性系统, 如图 3 所示。

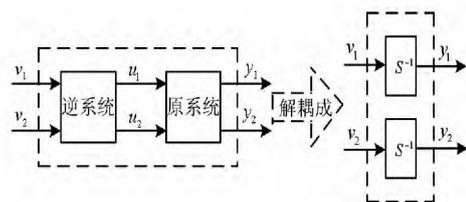


图 3 逆系统方法线性化原理图

这样构造出来的伪线性系统可解耦成两个独立的线性子系统, 表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \\ y_1 = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = v_2 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (8)$$

根据逆系统的相对阶定义,可求得该系统的相对阶 $1 + 1 = 2 < 3$,所以伪线性系统存在一个隐动态,即式(4)中的第 3 式。该隐动态的稳定即是直流侧电容电压的稳定,采用 PI 控制使其稳定,如图 4 所示。

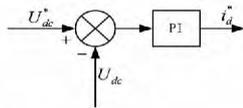


图 4 直流侧 PI 控制图

2.4.4 变结构控制方法设计

现对已进行线性化解耦的伪线性系统进行变结构控制方法设计^[13]。对于线性子系统式(7),要实现 $x_1 \rightarrow x_1^*$,且考虑到子系统中输入与输出为一重积分关系,故选取切换面为

$$S_1 = x_1 - x_1^* \quad (9)$$

综合考虑状态变量收敛速度及抖动现象,取变结构控制的指数趋近率如下。

$$\dot{S}_1 = -\xi_1 \text{sat}(S_1) - kS_1 \quad (10)$$

式中 k 值取较大, ξ 值取较小,可有效提高收敛速度,降低抖动现象。为进一步减小抖动,用饱和函数 $\text{sat}(\ast)$ 以代替传统变结构控制中的符号函数。

联立式(7)、(9)、(10),得到子系统式(7)的变结构控制率为

$$v_1 = -\xi_1 \text{sat}(x_1 - x_1^*) - k_1(x_1 - x_1^*) \quad (11)$$

同理,得到线性子系统式(8)的变结构控制率为

$$v_2 = -\xi_2 \text{sat}(x_2 - x_2^*) - k_2(x_2 - x_2^*) \quad (12)$$

将式(11)、(12)代入式(6),可得原系统的输入控制量 u_1 、 u_2 为

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{x_3} (u_d - Rx_1 + L\xi_1 \text{sat}(x_1 - x_1^*) \\ \quad + Lk_1(x_1 - x_1^*) + L\omega x_2) \\ u_2 = \frac{1}{x_3} (u_q - Rx_2 + L\xi_2 \text{sat}(x_2 - x_2^*) \\ \quad + Lk_2(x_2 - x_2^*) - L\omega x_1) \end{cases} \quad (13)$$

求得 u_1 、 u_2 后,经 Park 逆变换和正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM),得到逆变器的控制信号^[14],从而实现了 STATCOM 无功功率的精确补偿,其控制原理如图 5 所示。

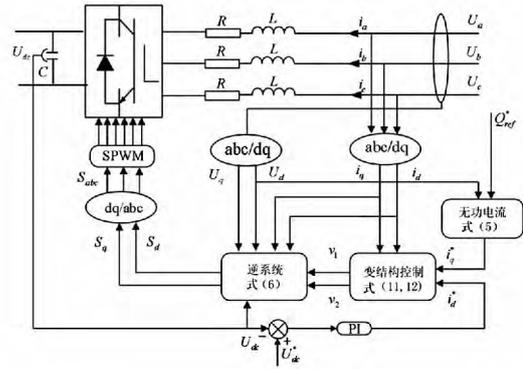


图 5 STATCOM 控制原理图

3 仿真分析

为验证所提装置及其控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 软件中搭建仿真模型。各仿真参数为:系统电压 10 kV,频率 50 Hz,TSC 共有三组,每组容量为 4 Mvar,STATCOM 容量为 2 Mvar,变压器变比为 4,其折算到 STATCOM 侧的电阻为 0.01 Ω 、电感为 2 mH,直流侧电容 7 mF。变结构控制参数 $\xi_1 = \xi_2 = 3$, $k_1 = k_2 = 3000$,直流侧 PI 控制参数 $K_p = 10$, $K_i = 1$ 。

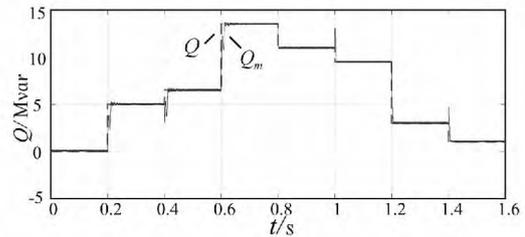


图 6 混合无功补偿装置补偿无功值 Q_m

系统需补偿无功功率如图 6 中的 Q 所示,初始为 0 Mvar,0.2 s 时突变为 5 Mvar,0.4 s 时突变为 6.5 Mvar,0.6 s 时突变为 13.5 Mvar,0.8 s 时突变为 11 Mvar,1 s 时突变为 9.5 Mvar,1.2 s 时突变为 3 Mvar,1.4 s 时突变为 1 Mvar。 Q 值为正表示发出感性无功功率。

根据系统需补偿无功功率值 Q ,经专家系统推理,确定 TSC 投切组数 P 及 STATCOM 无功功率补偿指令值 Q_{ref}^* ,并实时更新已投电容器组数 m ,从图 7(a)、(b)中能看出 m 值始终处于 0 与 3 之间, Q_{ref}^* 的大小始终在 STATCOM 补偿容量之内,均满足设计要求,且如图 6 所示,二者补偿总和 Q_m 恰等于系统所需补偿无功功率 Q ,这说明专家系统设计的正确性。图 7(b)同时表明,基于逆系统的变结构控制方法可使 STATCOM 快速、准确地追踪指令值,说明 STATCOM 控制器的正确性。图 7(c)中,采用预充电技术,并在电压峰值处投入电容器组几乎不会产生

生涌流,说明 TSC 控制器的正确性。

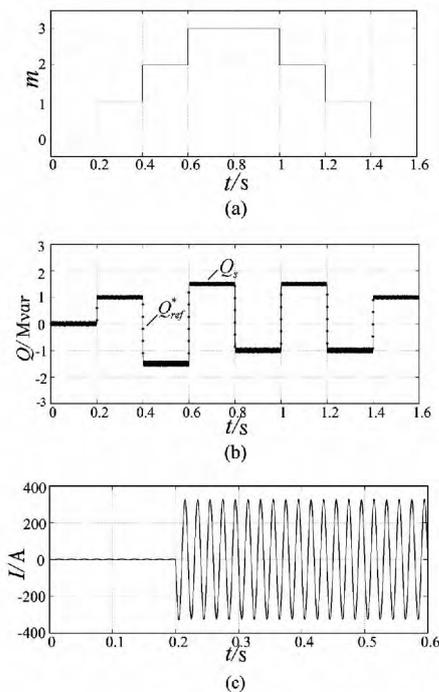


图 7 电容器组投入组数 m 、STATCOM 无功补偿值 Q_s 、电容器组 A 相电流 I

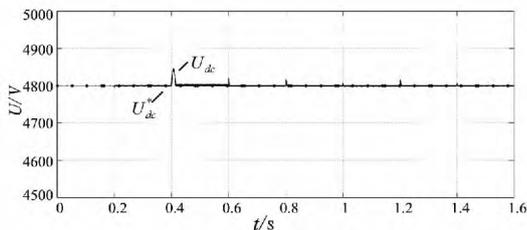


图 8 直流侧电压 U_{dc}

图 8 为逆变器直流侧电容电压期望值 U_{dc}^* 与实际值 U_{dc} 波形。由图 8 可知,装置在进行无功补偿时,逆变器直流侧电容电压 U_{dc} 几乎保持不变,即使发生小波动也快速稳定在期望值,满足设计要求。且图 6 已表明系统需补偿无功功率值 Q 发生变化,混合无功补偿装置能及时作出响应,准确补偿无功功率。这说明所采用的控制策略能使该混合装置具有良好的补偿效果。

5 结 论

所提出的 TSC + STATCOM 混合无功补偿装置能实现低成本、大容量、连续的无功补偿,弥补了 TSC 有级补偿及大容量 STATCOM 成本较高的缺点。采用分层控制结构,利用专家系统推理协调离散子系统 TSC 与连续子系统 STATCOM 二者的运行。同时,TSC 控制器保证了电容器组投入时几乎

不引起涌流,而基于逆系统的变结构控制策略使得 STATCOM 能准确跟踪指令值。仿真结果已表明该混合无功补偿装置具有良好的无功补偿效果。

参考文献

- [1] 蒋建民,冯志勇,刘美仪. 电力网电压无功功率自动控制系统[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2010: 1-11.
- [2] 张勇军,刘瀚林,朱心铭. 地区电网感性无功补偿优化配置方法[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 141-145.
- [3] 单翀峰,王奔,陈丹,等. 基于滑模控制理论的 STATCOM 无功补偿控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 150-154.
- [4] Nicolas Lechvin, Pierre Sicard, Ziwen Yao. Nonlinear Control of Static Synchronous Compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(3): 37-43.
- [5] 彭劲杰,樊晓平,李刚. 新型连续无功补偿装置的设计与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 86-90, 101.
- [6] 周诗嘉,方厚辉,方璐,等. 混合动态无功补偿系统的无功协调控制[J]. 电力电子技术, 2011, 45(10): 92-95.
- [7] 赵伟,罗安,唐杰,等. 静止无功发生器与晶闸管投切电容器协同运行混合无功补偿系统[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 92-98.
- [8] 毕天姝,倪以信,杨奇逊. 人工智能技术在输电网故障诊断中的应用分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 11-16.
- [9] 程武山. 智能控制理论、方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 56-96.
- [10] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 62-82.
- [11] 李庚银,陈志业,丁巧林,等. $dq0$ 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 176-179.
- [12] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 29-52.
- [13] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 328-330.
- [14] 刘向向,李新宇,王奔,等. 变结构控制策略在直驱永磁同步风力发电机中的应用[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 520-525.

作者简介:

张翔(1989), 硕士研究生, 研究方向为柔性交流输电和电能质量控制;

王奔(1960), 教授, 研究方向为电力系统非线性变结构控制;

冯阳(1987), 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

马明智(1987), 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制。

(收稿日期: 2014-01-15)