

MMC-HVDC 系统的模糊 PI 优化控制

康忠健, 张梓霖, 李 鑫, 赵振东

(中国石油大学(华东) 电气工程系, 山东 青岛 266580)

摘要: MMC-HVDC(基于模块化多电平换流器的高压直流输电)是近几年我国电力系统的重点研究方向。为了优化 MMC-HVDC 系统控制策略,将模糊控制和 PI(比例积分)控制相结合,设计了模糊 PI 控制器,实现对 PI 参数进行实时调节的功能。使用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了双端有源 31 电平 MMC-HVDC 系统仿真模型,对比分析传统 PI 控制器和模糊 PI 控制器下的仿真波形。分析结果表明,所设计的模糊 PI 控制器能有效提高双端有源 MMC-HVDC 系统的稳态响应特性和鲁棒性,提高电能质量。

关键词: MMC-HVDC; 控制策略; 模糊 PI 控制

文章编号: 1007-1881(2019)08-0059-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.201908010

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fuzzy PI Optimal Control of MMC-HVDC System

KANG Zhongjian, ZHANG Zilin, LI Xin, ZHAO Zhendong

(Department of Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: MMC-HVDC(modular multilevel converter based high-voltage direct current) is a key research direction in domestic power system in recent years. In order to optimize MMC-HVDC control strategy, fuzzy control and PI (proportional integral) control are combined to design a PI controller for real-time adjustment of PI parameters. By use of MATLAB/Simulink simulation software, the MMC-HVDC simulation model of dual-terminal 31-level active power is built, and the simulation waveforms of the two controllers are compared. The simulation results show that the designed fuzzy PI controller can improve steady-state response characteristics and robustness of dual-terminal 31-level active power as well as the power quality.

Keywords: MMC-HVDC; control strategy; fuzzy PI control

0 引言

MMC-HVDC(基于模块化多电平换流器的高压直流输电)较传统直流输电拥有极大的优势,不存在无功补偿和换相失败等问题,并且可为无源系统供电,因此迅速得到了广泛关注,并成为目前我国电力系统的重点研究方向。MMC-HVDC 系统通常采用传统 PI(比例积分)控制。在系统运行过程中传统 PI 控制器的参数无法改变,在发生故障、突增扰动或给定时,无法实时调节参数以达到更好的控制效果。使用模糊 PI 控制可以根据运行状况实时调整参数,使系统拥有更好的动

稳态性能。文献[1-6]对 MMC 的数学模型进行详细介绍并由此提出基于 PI 调节器的双闭环控制;文献[7-8]针对 MMC 故障设置了模糊自适应控制,对控制进行优化,提高了系统鲁棒性;文献[9-17]对模糊 PI 控制的优化和设计进行了介绍,并运用于不同系统,验证了模糊 PI 控制的优越性。上述文献中的模糊控制设计对量化因子和比例因子的选取和设计描述较为粗糙,对突增给定的响应仿真分析较少。本文针对双端有源 MMC-HVDC 系统设计了模糊 PI 控制器,以提高系统稳态响应特性和鲁棒性。

1 双端有源 MMC-HVDC 控制策略简述

MMC 控制是基于同步旋转坐标系的向量控制^[18],系统主要由内环电流控制器和外环功率控

制器构成。外环功率控制器如图1所示,其中 P , Q , U_{dc} 分别为有功功率、无功功率、直流电流(下标中的“ref”和“meas”分别表示参考值和测量值,“d”和“q”分别表示d轴和q轴分量,下同)。外环功率控制器的作用是:可以根据所设定的功率或直流电压参考值,经过PI调节得出内环电流控制器的d轴和q轴参考值 i_{dref} , i_{qref} 。

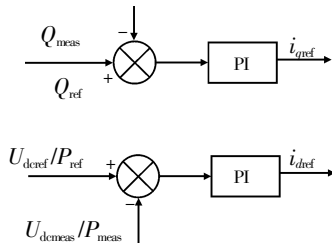


图1 外环功率控制

内环电流控制器如图2所示,其中 ω 为电网角频率, L 为MMC换流站等效电感, U_s 为网侧电压测量值, i 为MMC交流电流, U_c 为内环控制器输出调制波。内环电流控制器的作用是:能够实现对输出电流d轴和q轴电流分量的快速解耦控制,可使电流快速跟随给定,确定控制变量,即MMC上下桥臂的差模电压。

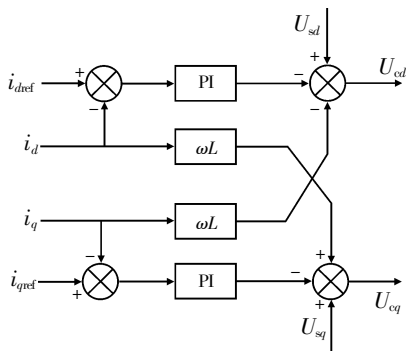


图2 内环电流控制

2 模糊PI控制原理

模糊控制器的核心是合理的模糊规则,模糊规则用模糊条件语言(if-then, or, and, also)进行描述,控制器的输入量经过模糊化形成合适的模糊输入。论域尺度和隶属函数等存放在数据库中。规则库向推理机提供控制规则后,推理机对输入量进行求解,输出量用加权平均法反模糊化^[19],驱动被控对象。

为了得到准确的输出变量动态响应,选择二维模糊控制器,输入为误差 e 和误差率 e_c ,得到的比例参数 K_p 、积分参数 K_i 会影响系统的性能^[20]。在实际操作中,对于不同的输入, K_p , K_i 的调整规则见表1。

表1 K_p , K_i 的调整规则

输入条件	K_p	K_i
e 较大	较大	0
e, e_c 中等	较小	适当大小
e 较小	较大	较大

3 模糊PI控制器设计

PI控制器的系统给定值为 $r(t)$,系统输出量为 $y(t)$,控制器输出的控制量为 $u(t)$,系统给定值和输出值的误差为 $e(t)$,将 $e(t)$ 作为控制器的输入,控制目标是使误差为0。

传统PI控制器时域算法:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_{p0}s + K_{i0}}{s} \quad (3)$$

式中: K_{p0} , K_{i0} 为比例、积分参数初始值; s 为拉普拉斯算子。

模糊PI控制器的设计如图3所示,其中 R_{in} 为系统输入量, E 为输入量和反馈量的差值, E_c 为差值的微分。在PI控制器的基础上进行改进,将 E 和 E_c 作为输入,得出 K_p 和 K_i 的修正量 ΔK_p 和 ΔK_i ,对反馈量进行实时采集,便可实时调节 K_p 和 K_i 的值,尽可能使测量值跟踪参考值的变化。

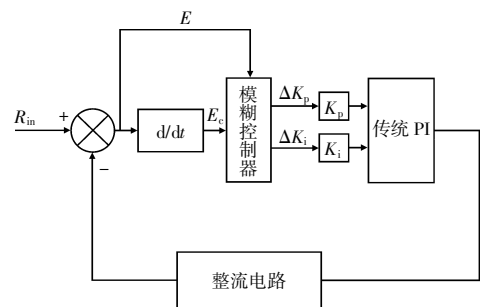


图3 模糊PI控制器的设计框图

模糊 PI 控制器算法:

$$K'_p = K_{p0} + \Delta K_p, \quad (4)$$

$$K'_i = K_{i0} + \Delta K_i, \quad (5)$$

$$\Delta K_p = \{E, DE\}_p \times K_{u1}, \quad (6)$$

$$\Delta K_i = \{E, DE\}_i \times K_{u2}, \quad (7)$$

式中: $\{E, DE\}_p, \{E, DE\}_i$ 为模糊推理的模糊值; $\Delta K_p, \Delta K_i$ 为模糊推理的精确修正值; K_{u1}, K_{u2} 为输出因子。

设直流电压的误差为 e , 误差变化率为 e_c , 直轴电流指令 i'_{dref} 为控制器的输出为 u 。选取的语言变量词集均为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, PB, PM, PS, ZE, NS, NM 和 NB 这 7 个语言变量分别代表正大、正中、正小、零、负小、负中和负大^[21]。 e 的模糊论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, $e_c, \Delta K_p, \Delta K_i$ 的模糊论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ^[22]。系统中直流电压设定值为 20 kV, 传统 PI 控制器的固定参数为 $K_p=1, K_i=10$, 因此控制器的输入 $e=20 \text{ kV}-U_{dc}$, 误差变化率 $e_c=e_k-e_{k-1}$, 最终的实际 PI 参数为 $K'_p=1+\Delta K_p, K'_i=10+\Delta K_i$ 。对 K_p, K_i 进行在线整定, 从而提高控制系统的性能。

合理选择模糊控制器输入变量的量化因子和输出变量的比例因子是非常重要的, 量化因子的大小对控制系统的动态性能影响很大^[23]。量化因子 K_e, K_{ec} 的取值大小可以使基本论域发生不同程度的缩小和放大。选择合适的量化因子使精确量准确变成论域内的量, 否则会使得模糊控制失效。量化因子 K_e, K_{ec} 过小, 基本论域放大, 会降低误差控制灵敏度。比例因子 K_u 过大会造成被控过程阻尼程度的下降, 导致系统震荡; K_u 过小则会导致被控过程响应特性迟缓。

由于 $U_{dc}=20 \text{ kV}$, e 的最大值为 20 000, 希望在 $e=7\ 500$ 时开始进行模糊调节, 取 $K_e=6/15\ 000, K_{ec}=6/8\ 000$; 经过大量仿真实验, 选取 $K_{u1}=K_{u2}=1$; 根据经验可确定出在论域 U 上用以描述模糊子集的隶属函数 $\mu(x)$ 为 trimf。

为了得到良好的系统响应性能, 通过大量仿真实验总结归纳规律, 得到 ΔK_p 和 ΔK_i 的控制规则^[24-30]如表 2、表 3 所示。使用 MATLAB 中模糊规则编辑器对模糊规则进行编辑。

误差 e 和误差变化率 e_c 隶属函数变量的具体数据见表 4、表 5。

表 2 ΔK_p 整定模糊控制规则

误差率 e_c	误差 e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3 ΔK_i 整定模糊控制规则

误差率 e_c	误差 e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 4 误差 e 隶属函数变量的具体数据

NAME	TYPE	PARAM
NB	trimf	[-4 -3 -2]
NM	trimf	[-3 -2 -1]
NS	trimf	[-2 -1 0]
ZO	trimf	[-1 0 1]
PS	trimf	[0 1 2]
PM	trimf	[1 2 3]
PB	trimf	[2 3 4]

表 5 误差变化率 e_c 隶属函数变量的具体数据

NAME	TYPE	PARAM
NB	trimf	[-8 -6 -4]
NM	trimf	[-6 -4 -2]
NS	trimf	[-4 -2 0]
ZO	trimf	[-2 0 2]
PS	trimf	[0 2 4]
PM	trimf	[2 4 6]
PB	trimf	[4 6 8]

选择三角形隶属函数作为 7 个语言变量的函数。在实际操作中, 用 MATLAB 中的隶属函数编辑器, 对隶属函数进行选择 and 参数设置。误差 e 和误差变化率 e_c 的隶属函数曲线如图 4、图 5 所示。

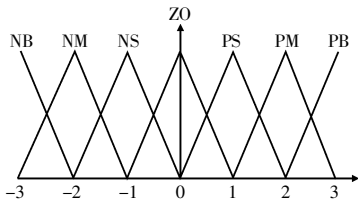


图4 e 的隶属函数曲线

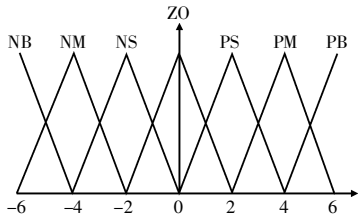


图5 e_c 的隶属函数曲线

4 数值仿真分析

用 MATLAB/Simulink 搭建 31 电平 MMC-HVDC 双端有源系统,如图 6 所示。参数设置为:直流电压 20 kV,交流测线电压 10 kV,频率 50 Hz,有功功率 2 MW,无功功率 0 Mvar,桥臂子模块 30 个,模块单元电容 3 981.25 μF ,桥臂电感 15.92 mH。

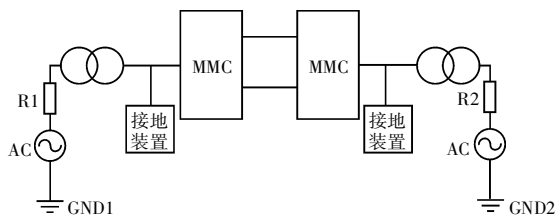


图6 MMC-HVDC 系统结构

稳态特性仿真:从 $t=0$ 时刻开始仿真,直流电压给定值 $U_{dref}=20$ kV,系统直流电压从 0 增加到给定值。观察 2 种控制器下的稳态响应,仿真结果如图 7 所示, U_{dc} 仿真波形相关数据见表 6。

下面分析系统启动过程中,2 种控制器下直流电压从 0 增加到给定值的稳态响应过程。在系统仿真开始后,MMC 当中的模块开始充放电,直流电压从零逐渐增大到给定值 20 kV。使用传统 PI 控制器时,产生的波形超调较大,直流电压达到给定值的时间较长,在峰值处振荡剧烈。使

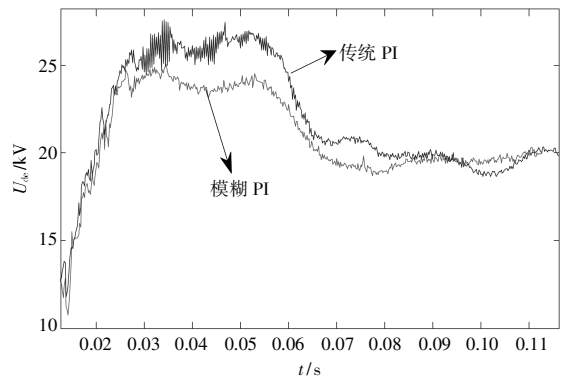


图7 2 种控制器下的 U_{dc} 波形

表6 U_{dc} 仿真波形相关数据

控制器	超调量	峰值时间/s	调节时间/s
传统 PI	0.375	0.034 4	0.11
模糊 PI	0.230	0.032 0	0.09

用模糊 PI 控制器时,由于 PI 参数可以不断调节,波形的超调明显减小,达到给定值的时间更快,且在峰值处振荡明显减小。

暂态特性仿真 1:当直流电压达到给定值后,在 $t=0.5$ s 时突增给定,使得直流电压的给定值为 21 kV,观察 2 种控制器输出的直流电流给定值 i_{dref} 波形,仿真结果如图 8、图 9 所示, i_{dref} 仿真波形相关数据见表 7。

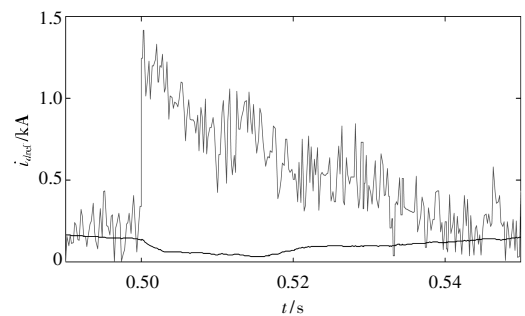


图8 使用传统 PI 控制器时的 i_{dref} 波形 1

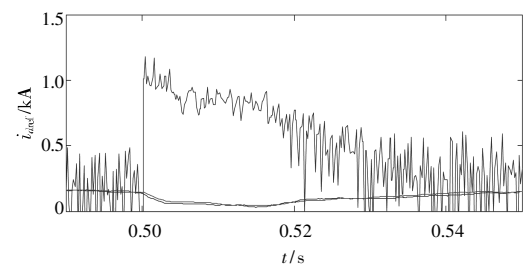


图9 使用模糊 PI 控制器时的 i_{dref} 波形 1

表 7 i_{dref} 仿真波形 1 相关数据

控制器	$t=0.5$ s 处 i_{dref} 峰值/kA
传统 PI	1.4
模糊 PI	1.0

暂态特性仿真 2: 当有功功率达到给定值后, 在 $t=0.5$ s 时突增给定, 使得有功功率的给定值为 3 MW, 观察 2 种控制器输出的直流电流给定值 i_{dref} 波形, 仿真结果如图 10、图 11 所示, i_{dref} 仿真波形相关数据见表 8。

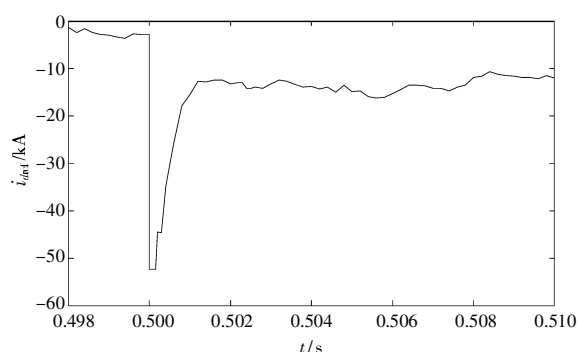


图 10 使用传统 PI 控制器时的 i_{dref} 波形 2

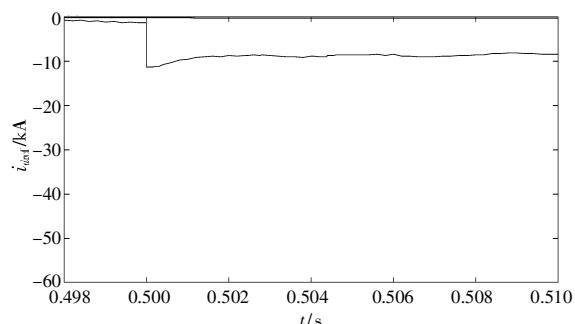


图 11 使用模糊 PI 控制器时的 i_{dref} 波形 2

表 8 i_{dref} 仿真波形 2 相关数据

控制器	$t=0.5$ s 处 i_{dref} 峰值/kA
传统 PI	-52.40
模糊 PI	-11.22

下面分析直流电压和有功功率给定突增时, 2 种控制器下直流电流给定值 i_{dref} 的响应。由于 i_{dref} 是 PI 控制器的输出量, 因此会产生突增。仿真结果表明: 经过传统 PI 控制器调节的输出波形呈尖峰状, 在给定突增的瞬间变化幅度很大, 响应变化的程度剧烈; 由于模糊 PI 控制器根据规则表调节了 K_p , K_i 的大小, 经过模糊 PI 控制器调

节的输出波形在给定突增的瞬间响应较为缓和, 系统内部更加稳定, 系统暂态响应特性和鲁棒性均得到了提高。

5 结语

本文针对 MMC-HVDC 系统整流侧换流器设计了电压、电流双闭环控制器。用传统 PI 控制器进行控制时, 其直流电压在扰动过程中超调大, 调节时间长, 因此, 基于模糊控制原理对控制器进行了优化设计。仿真结果表明, 模糊 PI 控制能有效减小扰动时电压超调, 缩短电压调节时间, 提高 MMC 系统的稳态响应特性, 对实际的 MMC-HVDC 系统控制优化具有一定的操作价值。

参考文献:

- [1] 杨海倩. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统暂态特性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [2] 吴广禄, 周孝信, 王姗姗, 等. 柔性直流输电接入弱交流电网时锁相环和电流内环交互作用机理解析研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2622-2633.
- [3] 张锐. 柔性直流输电系统 MMC 调制技术及控制策略研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
- [4] OOI B T, WANG X. Boost-type PWM HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1557-1563.
- [5] 管敏渊, 徐政. MMC 型柔性直流输电系统无源网络供电的直接电压控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 1-5.
- [6] JOVICIC D, FAR A J. Phasor model of modular multilevel converter with circulating current suppression control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1889-1897.
- [7] 王艳丽. 模块化多电平变换器及其控制策略的研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [8] 高金城. 电网电压不对称工况下 VSC-HVDC 控制策略研究[D]. 太原: 山西大学, 2018.
- [9] 罗海福, 毛义梅, 张晶. 一种参数自适应模糊 PID 控制器的设计与仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2001(3): 48-50.
- [10] 侯斯科, 杨宏斌. 最优模糊控制在悬臂梁振动控制系统中的研究[J]. 控制理论及其应用, 2012, 34(1): 71-74.
- [11] 韩瑞珍, 陈国定, 杨马英. 基于控制的新型模糊控制方法工业控制计算机[J]. 工业控制计算机, 2001, 14(9): 41-43.
- [12] 贾栋. 模糊 PID 在地铁环境控制系统中的研究和应用[D]. 天津: 天津理工大学, 2018.
- [13] 严永锋. 基于模糊 PID 控制的城市综合管廊通风系统

- [D].上海:华东理工大学,2018.
- [14] 李登辉.基于改进 BBO 算法的模糊 PID 控制策略研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [15] 苏兴华.基于模糊控制理论的 PID 控制器设计[J].中国管理信息化,2019,22(3):136-139.
- [16] 陈午阳.变论域模糊 PID 控制在直流电机中的应用[D].北京:北方工业大学,2018.
- [17] 胡包钢,应浩.模糊 PID 控制技术的研究发展回顾及其面临的若干重要问题[J].自动化学报,2006(24):567-584.
- [18] 赵成勇,许建中,李探.模块化多电平换流器直流输电建模技术[M].北京:中国电力出版社,2017.
- [19] 王刘柱.城际高铁刹车试验系统制动控制单元设计与研究[D].镇江:江苏科技大学,2012.
- [20] 郑倩倩.无源网络接入 MMC-HVDC 的模糊自适应 PI 控制策略研究[D].武汉:武汉大学,2017.
- [21] 马晓娜,朱爱红,卢稳.基于灰色预测模糊 PID 控制的列车 ATO 系统优化[J].铁道标准设计,2018,62(8):163-167.
- [22] 胡海峰.基于模糊 PID 控制的太阳能光伏发电系统的 MPPT 研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [23] 王秀丽.风电控制技术研究与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [24] 张国良,曾静,柯熙政.模糊控制及其 MATLAB 应用[M].西安:西安交通大学出版社,2004.
- [25] 徐雨哲,徐政,张哲任,等.基于 LCC 和混合型 MMC 的混合直流输电系统控制策略[J].广东电力,2018,31(9):13-25.
- [26] 李健,陈卓.双端有源 MMC-HVDC 系统的控制策略研究[J].电力大数据,2018,21(7):14-21.
- [27] 夏成军,刘志江,杜兆斌.基于变目标控制的 MMC-HVDC 控制策略[J].电力工程技术,2018,37(3):7-13.
- [28] 朱铭炼,姜田贵,欧阳有鹏,等.模块化多电平换流器直流双极短路故障耐受能力研究[J].电力工程技术,2018,37(2):44-48.
- [29] 唐立,袁旭峰,李宁,等.具有直流故障电流阻断能力的 MMC 子模块拓扑结构研究[J].电网与清洁能源,2017,33(5):31-39.
- [30] 时国平,钱叶册,孙佐,等.模糊 PI 控制的扰动观察法在光伏系统中应用[J].浙江水利水电学院学报,2017,29(4):75-78.

收稿日期:2019-04-30

作者简介:康忠健(1971),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析与控制、电能质量分析与控制等方面的研究工作。

(本文编辑:方明霞)