

基于ESO的电压平衡器模型预测控制方法

李飞

(德州职业技术学院 新能源技术工程系, 山东 德州 253034)

摘要:为改善双极性直流微电网的电能质量,提出了一种基于扩展状态观测器的模型预测控制方法,用于电压平衡器中点电压平衡控制及输出电流的改善。首先建立平衡器的数学模型,并根据其传递函数中的负载扰动项,设计基于扩展状态观测器的模型预测控制,最终实现输出电流的跟踪控制。在负载切换情况下,与传统基于闭环结构的模型预测控制相比,该方法提高了系统的响应速度,抑制了电压平衡控制的超调量;与基于输出采样的模型预测控制相比,该方法不需要增加传感器,在有效抑制输出电流波动的同时,降低了系统成本。最后,通过搭建仿真与实验平台,进行仿真分析与实验验证,结果表明:所提方法显著提高了电压平衡器对双极性直流母线的调节性能。

关键词:双极性直流微电网;电压平衡器;模型预测控制;扩展状态观测器

中图分类号:TM341 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19278

The Predictive Control Method of Voltage Balancer Model Based on ESO

LI Fei

(New Energy Technology Engineering Department, Dezhou Vocational and Technical College,
Dezhou 253034, Shandong, China)

Abstract: In order to improve the power quality of bipolar DC microgrid, a model predictive control method based on the extended state observer was proposed for balancer to realize midpoint voltage balance control and improve the output current. Firstly, the mathematical model of the balancer was established. After the analysis of load perturbation, a model predictive control method based on the extended state observer was designed to track the output current. Compared with traditional MPC with feedback, the response speed of the system was improved greatly and the system recovery time was reduced. Compared with traditional MPC with measurement, the neutral current ripple was suppressed effectively with low cost. Finally, the simulation analysis was carried out by constructing the simulation platform. The simulation results show that the proposed method significantly improves the regulation performance of the voltage balancer on the bipolar DC bus.

Key words: bipolar DC microgrid; voltage balancer; model predictive control (MPC); extended state observer (ESO)

21世纪以来,新能源产业的发展速度大大加快,伴随这一发展趋势,直流微电网因其具有较少的功率变换装置,且不存在有功、无功调节等问题,引起了国内外众多学者的高度重视^[1]。

根据低压直流系统(LVDC)的母线数量的不同,直流微电网可分为单极性和双极性2种形式^[2]。与单极性结构相比,双极性的三线制(正、负极母线以及中线)直流微电网结构具有2个电压等级,一方面可降低电压绝缘水平、有效提高直流供电系统的可靠性;另一方面有利于不同电压等级的分

布式能源(光伏发电、风力发电、内燃机)、储能系统、充电站及多种交直流负荷的接入^[3]。

目前构造双极性母线主要有3种形式,其中双电压源变换器(VSC)输入并联输出串联结构的缺点是体积大、成本高。其次,使用具有中点电位平衡能力的三电平变换器(3L-converter)无法实现不平衡负载全范围内的电压平衡控制^[4]。然而,对于整流与电压平衡器而言,电压平衡器在双极性直流微电网中的典型应用框图如图1所示。与前2者相比,此方式实现了整流与双极性

同理可得 u_n 的s域表达式为

$$u_n = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot u_{dc} - \frac{1}{s(C_1 + C_2)} \cdot i_c \quad (8)$$

由式(7)、式(8)得电容电压差值 $\Delta u = u_p - u_n$ 如下式:

$$\Delta u = \frac{(C_2 - C_1)u_{dc}}{C_1 + C_2} + \frac{2}{s(C_1 + C_2)} \cdot i_c \quad (9)$$

设定一个二进制的开关函数 s , 当开关管 S_1 导通时, $s=1$; 当开关管 S_1 关断时, $s=0$ 。开关管 S_2 的开关信号与 S_1 信号互反, 并设有死区以防止桥臂直通。开关函数下, 电压平均值 u_s 如图3所示。

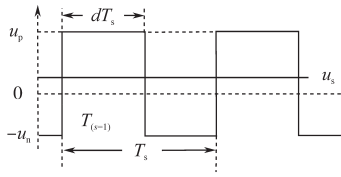


图3 开关管中点电势平均模型

Fig.3 The average model of u_s

图3中, 观察总时间 T_s , $s=1$ 状态时间为 T ($s=1$)。期间 $u_s = u_p$, 根据伏秒平衡原理得:

$$u_s T_s = T_{(s=1)} u_p + (T_s - T_{(s=1)}) u_n \quad (10)$$

因此 u_s 平均值的表达式为

$$u_s = d \cdot u_{dc} - \frac{u_{dc}}{2} + \frac{u_{avg}}{2} \quad (11)$$

其中

$$u_{avg} = \frac{u_p - u_n}{2} = \frac{\Delta u}{2}$$

$$d = \frac{T_{(s=1)}}{T_s}$$

由以上分析可知, 平衡器的数学模型如图4所示。

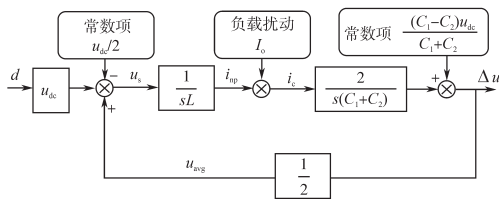


图4 平衡器数学模型

Fig.4 The mathematical model of balancer

假设正负极性母线电容相等, 即 $C_1 = C_2 = C$ 根据基尔霍夫电流定律, 中性点数学模型表达式为

$$C \frac{d(u_p - u_n)}{dt} = I_o - i_{np} \quad (12)$$

由式(12)可得电压平衡器的稳态解为

$$I_o = i_{np} \quad (13)$$

因此忽略图4中常数项, 电压平衡器的数学模型仅剩负载扰动项。因此其控制目标是实现

电感电流 i_{np} 快速跟随负载扰动电流 I_o 。同时控制 Δu 为零, 使母线电压平衡即 $u_p = u_n$ 。

2 传统 MPC 算法

MPC算法通过采集系统当前状态变量, 经预测模型计算下一时刻预测电流值, 从而选取使电流预测值与参考值偏差最小化的变流器开关动作。目前广泛应用于对控制快速性、精确性等动态特性要求较高的双极性直流微电网的供电场合。MPC控制框图如图5所示, 包括期望电感电流计算、电感电流预测模型、函数滚动优化3部分。

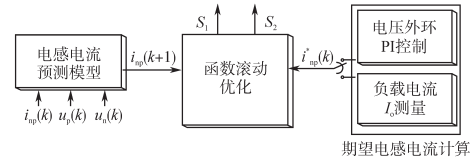


图5 MPC控制框图

Fig.5 The block diagram of the MPC

传统MPC算法^[9]中计算期望的电感电流的方法分为两种: 一种是使用电压外环PI控制后产生的电感电流参考值作为期望值; 另一种是直接测量负载电流 I_o , 作为预测控制的期望值。

对于传统方法1, 虽然电感电流的跟踪控制使用模型预测控制, 但外环电压的控制依然使用传统PI控制。该方法属于被动的反馈调节, 产生误差后, 将误差信息作为控制量的闭环控制, 导致控制环路中存在较大滞后性。在不平衡负载切换时, 不仅动态响应速度慢, 存在较大的电压过冲现象, 而且反向恢复时间长, 严重影响了双极性供电系统的电能质量。

对于传统方法2, 为实现电压平衡控制, 需要获取负载电流 I_o 信息直接采样, 不仅增加了系统成本, 而且降低了系统可靠性。更为甚者, 仅考虑了式(15)所示的系统稳态解, 忽略了 i_c 对电容电压的影响。由于电气回路中固有的LC环节, 使输出电流 I_o 在动态调节过程中存在低频波动, 严重影响双极性直流母线用电质量。

3 基于扩展状态观测器的MPC

针对以上2种传统MPC算法的缺点, 本文设计了一个基于扩展状态观测器ESO的模型预测控制。

3.1 模型预测控制器设计

通过检测 k 时刻的双极性直流母线电压值及

电感电流值,基于不同开关状态下的等效电路,构建预测模型来预测出 $k+1$ 时刻的电感电流值。

针对开关函数 s 的状态得到2个不同的等效电路,如图6所示。

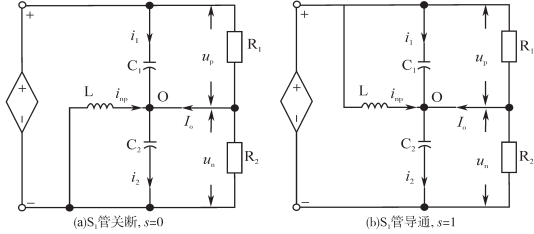


图6 开关状态下等效电路图

Fig.6 The equivalent circuits for switching states

当 $s=0$ 时,数学模型可得到如下表达式:

$$L \frac{di_{np}}{dt} = -u_n \quad (14)$$

当 $s=1$ 时,数学模型可得到如下表达式:

$$L \frac{di_{np}}{dt} = u_p \quad (15)$$

由式(14)、式(15)可以推导出各自相对应的时间离散化等式,如下式所示:

$$i_{np}(k+1) = \frac{T_s}{L} u_p(k) + i_{np}(k) \quad (16)$$

$$i_{np}(k+1) = -\frac{T_s}{L} u_n(k) + i_{np}(k) \quad (17)$$

式中: $u_p(k)$ 为 k 时刻正极性直流母线电压; $u_n(k)$ 为 k 时刻负极性直流母线电压; $i_{np}(k)$ 为 k 时刻电感电流值。系统采样频率为10 kHz时, $T_s=10^{-4}$ s。

然后建立正确的成本函数(cost function),计算出所有开关状态所对应的函数值,选择使函数值最小的那个开关状态作为 $k+1$ 时刻的开关状态,因此MPC不需要PWM调制。

为了使电感电流 i_{np} 能快速、准确地跟踪计算出的电流给定值,对此目标要建立合适的成本函数,如下式所示:

$$F_{k,s(0,1)} = |i_{np,(k+1),s(0,1)} - i_{np}^*|^2 \quad (18)$$

式中: $F_{k,s(0,1)}$ 分别为2个开关函数取值下的成本函数值。 $i_{np,(k+1),s(0,1)}$ 分别为相应开关函数取值下电感电流预测值。利用成本函数选择最优开关状态的两步示意图如图7所示。

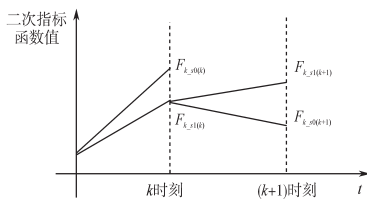


图7 2步成本函数 F_k 计算示意图

Fig.7 Calculation sketch of the cost function F_k for 2 steps

当 $k-1$ 时刻预测成本函数值时,得 $F_{k,s1}(k) > F_{k,s0}(k)$, k 时刻的开关状态选择 $s=1$,确定此时刻平衡器开关状态;当 k 时刻预测成本函数值时,得 $F_{k,s0}(k) < F_{k,s1}(k)$, $k+1$ 时刻的开关状态选择 $s=0$,确定此时刻平衡器开关状态。

事实上,对2个成本函数值 $F_{k,s0}$ 与 $F_{k,s1}$ 进行比较,取其中较小的 F_k 值所对应的开关管状态作为下一时刻的开关管状态,从而完成对下一时刻开关器件动作方向的预测。综上,具体控制流程如图8所示。

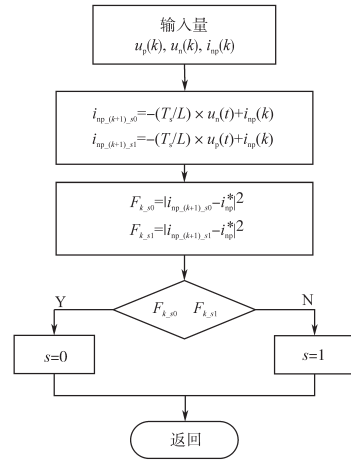


图8 模型预测控制算法流程图

Fig.8 The flow chart of model predictive control

2.3 扩展状态观测器设计

在无法预知不平衡负载切换情况下,为实现双极性直流母线恒压控制,需要获取电压平衡器的输出电流 I_o 信息,传统方法2通过霍尔传感器或者分流器进行测量。本文将负载输出电流 I_o 作为干扰项,设计一个干扰观测器的方法估计负载输出电流。其负载电流的估计值 $\hat{I}_o$ 作为期望的电感电流进行模型预测控制。本文针对电压平衡器,提出了如图9所示的基于扩展状态观测器的模型预测控制方法。

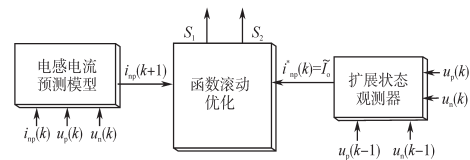


图9 基于扩展状态观测器的模型预测控制结构图

Fig.9 Model predictive control structure based on extended state observer

为设计负载干扰观测器,电压平衡器的数学模型式(9)可描述为

$$\frac{d(u_p - u_n)}{dt} = \frac{2i_c}{(C_1 + C_2)} \quad (19)$$

观测器的离散化数学模型为

$$\begin{aligned} \frac{C}{T_s} \cdot \{[u_p(k) - u_n(k)] - [u_p(k-1) - u_n(k-1)]\} \\ = \tilde{I}_o(k) + \lambda[u_p(k) - u_n(k)] \end{aligned} \quad (20)$$

式中: λ 为大于零的常数。在式(20)中,得到估算的中线电流 $\tilde{I}_o(k)$, 作为 k 时刻中线电流的期望值 $i_{np}^*(k)$ 。

若将本文提出如图9所示的控制方法用于图2所示的电压平衡器中,可达到如下控制效果:1) 无需增加额外的霍尔传感器进行输出电流测量;2) 双极性直流母线电压平衡控制(u_p, u_n)具有快速动态响应和高抗干扰能力;3) 输出电流 I_o 能够快速跟踪负载变化。在动态及稳态状态下,大幅降低输出电流波动,确保双极性直流母线的供电质量。

3 仿真与实验分析

为了验证所提方法的有效性,利用 Matlab/Simulink 仿真与实验平台验证。仿真和实验参数如下:直流母线电压 $u_{dc}=700$ V/220 V, 额定电压 $u_{p_ref}=u_{n_ref}=350$ V/110 V, 正极性负载 $R_1=5$ Ω /7.5 Ω , 负极性负载 $R_2=5$ Ω /7.5 Ω , 采样频率 $f_s=10$ kHz/10 kHz, 直流母线电容 $C=2$ 200 μ F/470 μ F, 中线电感 $L=0.5$ mH/0.2 mH。

仿真和实验中,在 $0 \sim 0.05$ s 时间内,负载 R_1 与 R_2 分别作为正负极性负载;在 $0.05 \sim 0.15$ s 时间内,切掉负载 R_2 ;在 $0.15 \sim 0.25$ s 时间内,切掉负载 R_1 ,同时投入负载 R_2 。先是对采用电压外环控制器生成期望值的 MPC 方法 1 及采用霍尔传感器或者分流器采集输出电流信息的 MPC 方法 2 进行对比仿真实验。图 10a、图 10b 分别给出了 2 种传统型预测控制下的动态波形图。由图 10 可知,基于模型预测控制的双极性直流母线电压在不平衡负载切换时,输出中线电流 I_o 在稳态时均能跟踪期望值。

然而传统 MPC 方法 1 中,由于采用电压外环 PI 控制器生成期望值,电压 u_p, u_n 存在较大超调量 $\Delta u=28$ V 与恢复时间 $T_{rec}=0.07$ s。此外对于 $0.05 \sim 0.15$ s 时间内,观察 $-75 \sim -65$ A 区间输出电流 I_o 可知, I_o 在负载切换瞬间存在较大电流误差 $\Delta I_o=5$ A,并具有缓慢的调节过程。

对于传统 MPC 方法 2,由于采用霍尔传感器

或者分流器采集了输出电流信息, I_o 直接作为期望的电感电流 i_{np}^* , 增加了变换器成本。与使用电压外环 PI 控制器相比,虽然直流电压超调幅值得到了有效抑制,但是输出电流 I_o 引入了 LC 电气回路的低频波动,波动幅值 $\Delta I_o=4$ A。此波动不仅严重影响了双极性母线的供电质量,也再次引起稳态状态 u_p, u_n 低频波动 $\Delta u=12$ V。

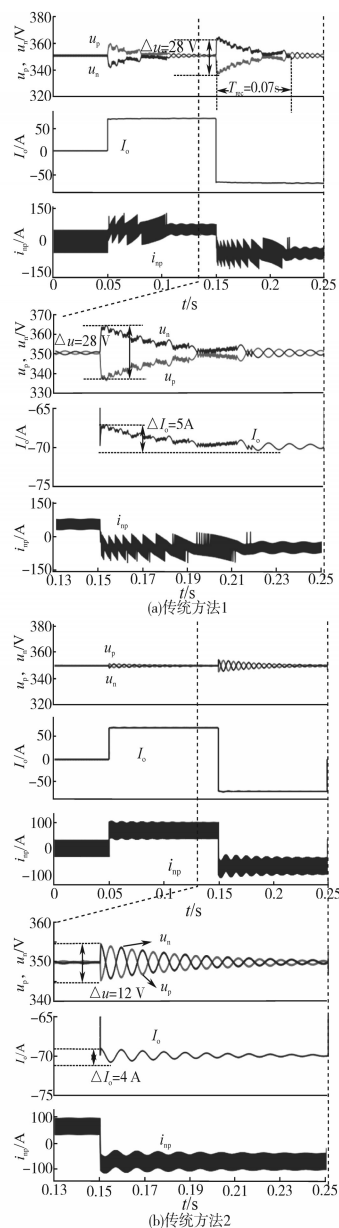


图 10 基于传统 MPC 的平衡器负载切换仿真波形

Fig.10 Simulation waveforms of load switching for balancer using traditional MPC controller

图 11 给出了本文所提的基于扩展状态观测器在负载切换时的仿真波形图。由图可知相同负载扰动下, u_p, u_n 的超调量仅为 8 V ($\Delta u=8$ V)。对于 $0.05 \sim 0.15$ s 时间内,观察 $-75 \sim -65$ A 区间

输出电流 I_o 可知,输出电流的波动幅值仅为1 A ($\Delta I_o=1$ A)。与传统方法相比,本文所提的基于扩展状态观测器的模型预测控制可使得电压平衡器在切换负载的扰动下,输出电流波动、直流电压平衡控制都表现出极佳的控制性能。

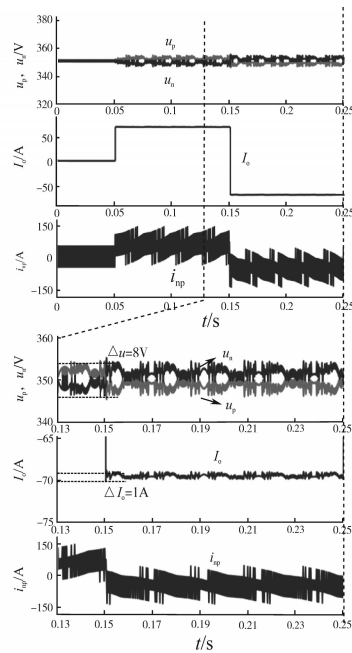


图11 基于ESO-MPC的平衡器负载切换仿真波形

Fig.11 Simulation waveforms of load switching for balancer using ESO-MPC controller

实验平台的直流输入电压 $u_{dc}=220$ V,利用平衡器控制双极性直流母线电压均为110 V。平衡器首先工作在平衡负载 $R_1=R_2=7.5\ \Omega$ 条件下,此时中线输出电流 $I_o=0$ A。当负载 R_2 突然切除后,此时中线输出电流 I_o 约15 A。分别使用传统MPC方法1,电压外环使用PI控制,控制器输出作为电感电流预测控制的期望值;传统MPC方法2,采集输出电流作为电感电流预测控制的期望值;本文所提出的基于扩展状态观测器的模型预测控制,设计扰动观测器估计输出电流 I_o 。测得的实验波形如图12所示。图12a使用电压PI控制+MPC电压平衡,双极性直流母线电压在负载切换时存在较大过冲量 $\Delta u=20$ V,其恢复时间超过125 ms。图12b使用测量负载电流与模型预测控制,直流电压 u_p, u_n 虽然没有超调量,但其波动幅值也达到12 V,并且输出电流也存在幅值2 A的波动。图12c中所示本文提出的ESO+MPC方法,在负载切换时具有极快的动态响应,而且基本无过冲。直流电压的振荡幅值进一步抑制到8 V,并且输出电流 I_o 在瞬态及稳态下,波动幅值

均小于1 A。综上所述,实验结果与仿真分析一致,对于双极性直流微电网系统来说,基于扩展状态观测器的模型预测控制极大地改善了电压平衡控制器的配电电能质量。

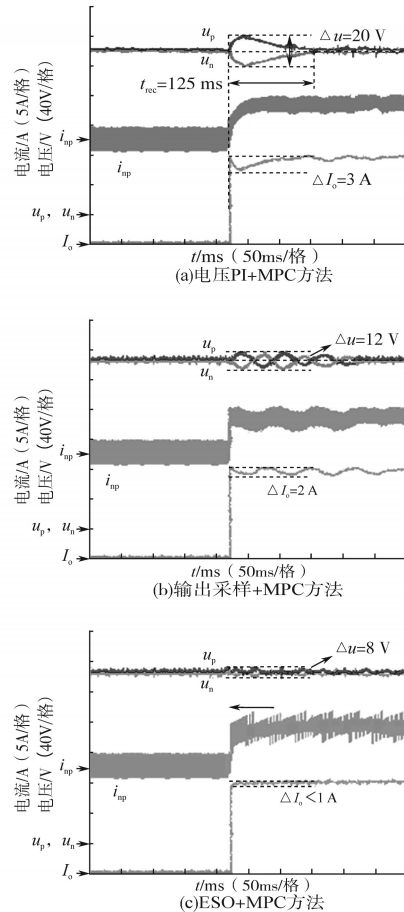


图12 负载切换时实验波形

Fig.12 Experiment waveforms with loads switching

4 结论

针对双极性直流微网,本文提出了一种基于扩展观测器的模型预测控制方法,用于平衡器的电压平衡控制及输出电流振荡抑制。该方法仅通过直流母线电压得到负载电流的估计值,以此为电感电流预测控制的期望值,实现输出电流的快速跟踪及中点电压平衡控制。通过仿真分析与实验验证,与传统模型预测控制方法相比,基于扩展状态观测器的模型预测控制方法能够在负载快速切换的情况下,避免直流母线电压过冲,提高变换器可靠性。保证精确输出负载电流的同时,在瞬态、稳态条件下,抑制了输出电流的波动,提高双极性直流母线的供电质量。

(下转第74页)

参考文献

- [1] Henry P, Krainin M, Herbst E, *et al.* RGB-D Mapping: Using Kinect-style Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments[J]. International Journal of Robotics Research, 2012, 31(5): 647-663.
- [2] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, *et al.* ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, 2011: 2564-2571.
- [3] Nguyen CV, Izadi S, Lovell D. Modeling Kinect Sensor Noise for Improved 3D Reconstruction and Tracking[C]//International Conference on 3D Imaging, 2012: 524-530.
- [4] Thrun S, Burgard W, Fox D. Probabilistic robotics[M]. Cambridge, MIT Press, 2005.
- [5] Khoshelham K, Elberink S O. Accuracy and Resolution of Kinectdepth Data for Indoor Mapping Applications[J]. Sensors, 2012, 12(2): 1437-1454.
- [6] Giorgio G, Kümmerle R, Strasdat H, *et al.* g²o: A General Framework for Graph Optimization[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 3607-3613.
- [7] Zhao L, Huang S, Dissanayake G. Linear SLAM: A Linear Solution to the Feature-based and Pose Graph SLAM Based on Submap Joining[C]//in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2013: 24-30.
- [8] TD Barfoot. State Estimation for Robotics[M]. Cambridge University Press, 2017.
- [9] Jürgen Sturm, Nikolas Engelhard, Felix Endres, *et al.* A Benchmark for the Evaluation of RGB-D SLAM Systems[C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on, 2012: 7-12.
- [10] Engel J, Schöps F, Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale Direct Monocular SLAM[C]//European Conference on Computer Vision, 2014: 834-849.

收稿日期:2018-07-05

修改稿日期:2018-08-07

(上接第66页)

参考文献

- [1] Ding Wenglong, Zhang Chenghui, Gao Feng, *et al.* A Zero-sequence Component Injection Modulation Method with Compensation for Current Harmonic Mitigation of Vienna Rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 801-814.
- [2] 丁文龙, 刘家君, 段彬, 等. VIENNA整流器中点电位振荡抑制与平衡控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7284-7293.
- [3] 李霞林, 张雪松, 郭力, 等. 双极性直流微电网中多电压平衡器协调控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 721-729.
- [4] Ding Wenglong, Liu Jaijun, Duan Bin, *et al.* Voltage Independence Control of Split-DC Bus for a Three-phase/level T-type Converter with Unbalanced Loads[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2017: 2811-2816.
- [5] Kakigano H, Miura Y, Ise T. Low-voltage Bipolar-type DC Microgrid for Super High Quality Distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [6] 张先进, 龚春英. 三电平半桥电压平衡器[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 114-119.
- [7] 汪飞, 雷志方, 徐新蔚, 等. 面向直流微电网的电压平衡器拓扑结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1604-1612.
- [8] 梅杨, 陈丽莎, 黄伟超, 等. 交错并联 Buck-Boost 变换器模型预测控制方法[J]. 电气传动, 2017, 47(7): 32-36.
- [9] 梅杨, 齐圆圆, 李晓晴. 光储系统中双向变换器的模型预测控制方法[J]. 电气传动, 2015, 45(11): 31-35.

收稿日期:2018-07-10

修改稿日期:2018-09-15