

光储微电网逆变器有限集模型预测控制

刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 王龙
(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 针对光储微电网并网稳定问题提出了一种有限集模型预测控制(FCS-MPC)方案。储能系统双向DC/DC变换器采用电压电流双环控制,以稳定直流母线电压。建立并网逆变器离散化数学模型,将逆变器输出电流作为成本函数控制量,构建电流预测控制器。逆变器电流采用前2步预测,并使用矢量角补偿法对控制过程进行延时补偿。利用MATLAB/Simulink搭建光伏储能微电网仿真模型,对比分析传统控制和模型预测控制的电压电流响应。结果显示,所提方案在负载变化和光伏功率波动情况下,能提高直流母线电压稳定性,减小并网电流畸变率。

关键词: 光储微电网; 有限集模型预测控制; 并网逆变器; 矢量角补偿

中图分类号: TM 762 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)12-0081-06

doi: 10.12177/emca.2020.162

Finite Control Set Model Predictive Control of Photovoltaic and Storage Microgrid Inverter

LIU Zhijian, LIU Jie, LI Pengcheng, WANG Long

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: A scheme of finite control set model predictive control (FCS-MPC) is proposed for the grid-connected stability of photovoltaic and storage microgrid. The bi-directional DC/DC converter of the energy storage system adopts voltage and current dual-loop control to stabilize the DC bus voltage. Then, the discrete mathematical model of the grid-connected inverter is established, and the output current of inverter is used as the cost function control variable to construct current predictive controller. Based on the prediction of the next two steps of inverter current, the vector angle compensation method is introduced to compensate for the delay of the control process. Finally, the simulation model of photovoltaic and storage microgrid is established by using MATLAB/Simulink, and the voltage and current responses under traditional method and MPC are compared and analyzed. Simulation results show that the proposed scheme can improve the DC bus voltage stability and reduce the grid-connected current distortion rate under load changes and photovoltaic power fluctuations.

Key words: photovoltaic and storage microgrid; finite control set model predictive control (FCS-MPC); grid-connected inverter; vector angle compensation

0 引言

为了减少温室气体排放保护环境,分布式发电单元越来越多地应用到配电网中^[1]。作为最有

前景的可再生能源之一,光伏发电(PV)容量一直在迅速增长。但由于PV的间歇性,PV通常配备储能系统(ESS),用于减少由光伏的随机特性引起的功率波动,该功率波动可能导致公用电网不

收稿日期: 2020-08-22; 收到修改稿日期: 2020-10-16

作者简介: 刘志坚(1975—),男,博士,教授,研究方向为电力系统分析、电力系统运行与控制等。

刘杰(1996—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与分析。

稳定^[2-3]。双向 DC/DC 转换器的低压和高压侧分别连接到储能电池组和直流配电网母线。文献[4]提出一种储能系统双向 DC/DC 转换器控制方案,以降低交流电网突然故障引起的微电网振荡。文献[5]提出了一种应用于超级电容储能系统的混沌控制方法,对快速平抑直流母线电压波动表现出较好效果。控制转换器减小直流母线电压波动,对稳定直流侧功率,减小并网电压电流振荡具有重要意义。并网逆变器作为将直流母线电压转换为交流电网电压的核心装置,通常使用空间矢量脉宽调制(SVPWM)对三相电压、电流进行并网控制,这种控制结构需要多个反馈环路和脉宽调制(PWM)调制器,其中的调制单元大大影响控制的动态响应速度^[6]。

有限集模型预测控制(FCS-MPC)是预测控制的派生产品,使用预定义的成本函数来使系统变量遵循其参考值。每个时间步上,在有限的预测范围内在线解决优化问题,从而得到最优的控制效果。与传统方法相比,FCS-MPC 无需调制器,且无需综合考虑预测时域、控制时域、各时域目标函数权值系数的配合设计等,可直接利用变换器的离散特性和开关状态有限的特性进行状态预测。虽然预测过程需要一定量计算,但随着微处理器的发展和应用,模型预测控制成为电力电子系统研究的热点之一^[7-8]。文献[9]提出一种光伏最大功率点跟踪(MPPT)和并网逆变器模型预测协调控制方案,在并网过程中具有良好的控制性能,但未考虑光伏功率造成的直流母线电压波动。文献[10-11]将功率作为成本函数控制量,提出了一种有限开关序列模型预测直接功率控制,可实现光伏并网功率的调控,但增加了预测过程的计算成本。

本文建立了光伏储能微电网系统模型,储能单元采用双环控制,用于平抑 PV 的功率波动,稳定直流母线电压。针对并网逆变器提出一种有限集模型预测方案,用于光伏并网发电系统和储能系统的协调控制。首先,通过分析逆变器工作原理建立离散化数学模型,推导电流预测值,并使用矢量角补偿法进行延时补偿。然后,对逆变器进行最优开关状态量选取从而控制电网的电压和频率稳定。最后,为了验证所提控制策略的有效性,利用 MATLAB/Simulink 搭建光伏储能并网系统

进行仿真验证。

1 光储系统建模

PV 是太阳能最主要的利用形式,但光伏电池因其固有的光伏特性,功率输出受光照强度、环境温度等因素的影响较大,表现为明显的非线性^[12]。典型的光伏输出特性曲线如图 1 所示。光伏元件经 Boost 变换电路与直流母线相连,通过改变变换器开关管的占空比可以调节变换电路两端的电压比,从而匹配负载阻抗。为了提高太阳能利用率,使光伏实时输出功率最大,需对 PV 单元进行 MPPT^[13]。目前已有多类文献对 MPPT 进行了研究,文中使用扰动观察法,在此不再赘述。

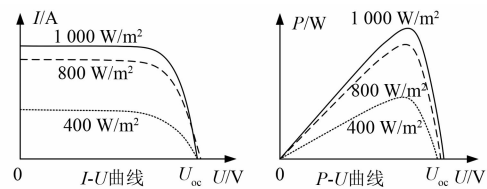


图 1 光伏输出特性曲线

由于环境的偶然性,为了降低 PV 功率不确定性带来的影响,可配合一定容量的储能单元以平抑光伏功率波动,稳定直流母线电压。图 2 为电池 ESS 的典型配置,储能电池通过双向 DC/DC 变换器连接到直流母线。变换器包括 2 个可控开关管 S_{1b} 、 S_{2b} 和一个电感器 L_b 。变换器有升压和降压 2 个工作模式^[14],当 S_{1b} 处于开关状态且 S_{2b} 始终关闭时,变换器以降压模式(buck)工作。 S_{1b} 接通($S_{1b} = 1$),能量通过 DC 母线存储在电感器 L_b 中, S_{1b} 关闭($S_{1b} = 0$),能量从电感器 L_b 存储到电池。类似地,当 S_{2b} 切换且 S_{1b} 关断时,变换器工作在升压模式(boost)。在 boost 模式下,电路模型可以表述为

$$\begin{cases} L_b \frac{dI_b}{dt} = U_b, S_{1b} = 0, S_{2b} = 1 \\ L_b \frac{dI_b}{dt} = U_b - U_{dc}, S_{1b} = 0, S_{2b} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Buck 模式下模型可以表述为

$$\begin{cases} L_b \frac{dI_b}{dt} = U_{dc} - U_b, S_{1b} = 1, S_{2b} = 0 \\ L_b \frac{dI_b}{dt} = -U_b, S_{1b} = 0, S_{2b} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

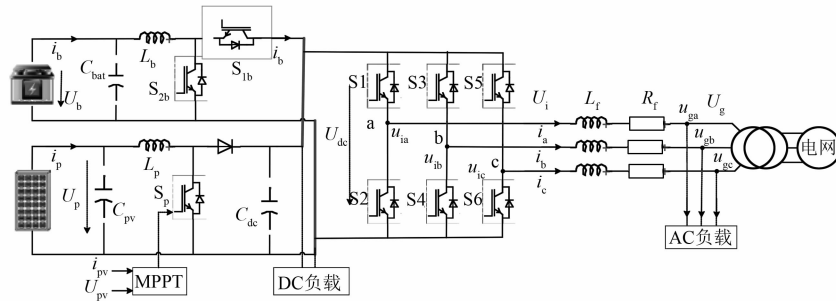


图2 典型光储微电网系统

通过控制电池的充放电,调节直流母线处功率流,可以实现母线电压的稳定。储能电池采用电压电流双环控制,包括2个PI控制器,控制原理如图3所示。电压外环PI控制器可调节母线电压误差,给出电感器参考电流,电流内环控制器用于控制电感器电流,并产生PWM控制信号。

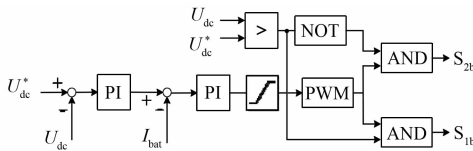


图3 储能双环控制原理图

2 逆变器电流预测模型

本文建立光储微电网并网系统如图2。其中, u_{ia} 、 u_{ib} 、 u_{ic} 为逆变器输出电压, i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器输出电流, L_f 和 R_f 为滤波阻感, u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 为三相电网电压。根据基尔霍夫定律,系统并网侧在 abc 三相坐标系下的状态方程为

$$\begin{bmatrix} u_{ia} \\ u_{ib} \\ u_{ic} \end{bmatrix} = L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义逆变器开关状态 $S_i (i=a,b,c)$ 为

$$S_i = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂导通,下桥臂关断} \\ 0, & \text{上桥臂关断,下桥臂导通} \end{cases} \quad (4)$$

考虑到同一桥上下桥臂不能同时导通,且空间矢量 $a = e^{j2\pi/3}$ 代表 120° 相位差,三相逆变器输出的8种电压矢量可表示为

$$U_i = \frac{2}{3} U_{dc} (S_a + a S_b + a^2 S_c), \quad i = 0, 1, 2, \dots, 7 \quad (5)$$

$$U_i = \begin{cases} \frac{2}{3} U_{dc} e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}}, & i = 1, 2, \dots, 6 \\ 0, & i = 0, 7 \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_i 为逆变器输出电压矢量; U_{dc} 为逆变器直流侧母线电压。

逆变器压流关系的矢量表示法为

$$U_i = L_f \frac{dI_L}{dt} + I_L R_f + U_g \quad (7)$$

式中: U_i 、 U_g 为 $\alpha\beta$ 坐标系下逆变器和电网电压矢量; I_L 为 $\alpha\beta$ 坐标系下逆变器交流侧输出电流矢量。

坐标变换矢量如图4所示。

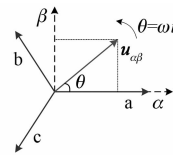


图4 坐标变换矢量

abc 三相坐标到 $\alpha\beta$ 两相坐标变换可表示为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

电流瞬时值用矢量法表示为

$$\begin{cases} i_\alpha = |I| \cos(\omega t) \\ i_\beta = |I| \sin(\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

逆变器开关状态如表1所示。

利用前向欧拉法^[15],一阶系统的离散时间模型导数近似为

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (10)$$

式中: T_s 是采样时间。

表 1 逆变器开关状态

S_a	S_b	S_c	输出电压矢量(U_i)
0	0	0	$U_0 = 0$
1	0	0	$U_1 = \frac{2}{3}U_{dc}$
1	1	0	$U_2 = \frac{1}{3}U_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$
0	1	0	$U_3 = -\frac{1}{3}U_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$
0	1	1	$U_4 = -\frac{2}{3}U_{dc}$
0	0	1	$U_5 = -\frac{1}{3}U_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$
1	0	1	$U_6 = \frac{1}{3}U_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$
1	1	1	$U_7 = 0$

通过式(10),离散化式(7)的结果为

$$i^p(k+1) = \left(1 - \frac{R_f T_s}{L_f}\right) i(k) + \frac{T_s}{L_f} [v_i(k) - u_g(k)] \quad (11)$$

式中: i^p 表示预测电流。

选择并网电流和电流参考值构建代价函数:

$$g = |i_{\alpha}^p(k+1) - i_{ref\alpha}(k+1)| + |i_{\beta}^p(k+1) - i_{ref\beta}(k+1)| \quad (12)$$

式中: i_{α}^p 和 i_{β}^p 分别为预测电流矢量的实部和虚部; $i_{ref\alpha}$ 和 $i_{ref\beta}$ 分别为参考电流矢量的实部和虚部。

考虑到 T_s 足够小时,一般认为参考量的未来值约等于当前值,即:

$$i_{ref}(k+1) \approx i_{ref}(k) \quad (13)$$

但这将导致跟踪参考电流时会产生1个采样周期的延迟,本文采用矢量角预测进行时延补偿^[16]。记 k 时刻的电流参考值 $i_{ref}(k)$ 为

$$i_{ref}(k) = |I_{ref}|(k)e^{j\theta(k)} \quad (14)$$

式中: $|I_{ref}|$ 为参考电流矢量幅值; $\theta(k)$ 为 k 时刻的矢量角。

则 $(k+1)$ 时刻的矢量角为

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \omega T_s \quad (15)$$

式中: ω 为电网角频率。

故 $(k+1)$ 时刻的参考电流矢量可表示为

$$i_{ref}(k+1) = |I_{ref}|(k+1)e^{j\theta(k+1)} = |I_{ref}|(k)e^{j[\theta(k)+\omega T_s]} = i_{ref}(k)e^{j\omega T_s} \quad (16)$$

同理 $(k+2)$ 时刻的参考电流矢量可表示为

$$i_{ref}(k+2) = i_{ref}(k)e^{2j\omega T_s} \quad (17)$$

对式(11)进行前2步预测:

$$i^p(k+2) = \left(1 - \frac{R_f T_s}{L_f}\right) i(k+1) + \frac{T_s}{L_f} [v_i(k+1) - u_g(k+1)] \quad (18)$$

补偿后的代价函数为

$$g = |i_{\alpha}^p(k+2) - i_{ref\alpha}(k+2)| + |i_{\beta}^p(k+2) - i_{ref\beta}(k+2)| \quad (19)$$

整个光伏逆变器 FCS-MPC 原理如图 5 所示。

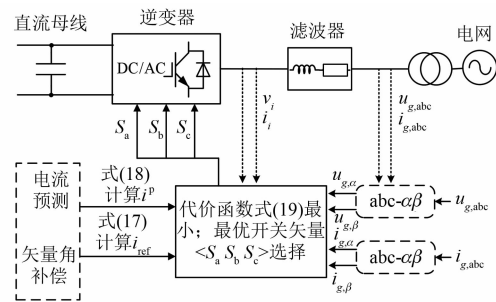


图 5 逆变器 FCS-MPC 原理

3 仿真分析

为了验证本文所提方法的有效性,利用 MATLAB/Simulink 搭建如图 2 的仿真模型,各元件参数取值如表 2 所示。设置直流负载为恒定电阻型线性负载,交流负载为恒定功率型负载,网侧为无限大容量系统,频率 $f=50$ Hz。

表 2 仿真参数

参数名称	参数值
光伏额定功率/kW	30
蓄电池	250 V, 20 Ah, 10% ≤ SOC ≤ 90%
光伏电感电容	$L_p = 6$ mH, $C_{pv} = 0.2$ mF
储能电感电容	$L_b = 0.3$ mH, $C_{bat} = 15$ mF
直流母线电压 U_{dc}/V	500
直流母线电容 C_{dc}/mF	20
交流母线电压 U_{ac}/V	380
滤波阻感	$L_f = 10$ mF, $R_f = 1.9$ mΩ
采样周期 $T_s/\mu s$	10
电压环: $k_p = 5, k_i = 13$	
电流环: $k_p = 4, k_i = 30, f = 3$ kHz	

图 6 显示了波动光伏功率和直流负载变化时直流侧仿真结果。在 1.5、2.5、4.0 s 时光照强度阶跃变化,光伏输出功率也跟随阶跃变化。直流负载分别于 1、2、3、4 s 阶跃突变,在 0~1.5 s 和 2.5~5.0 s 时光伏输出功率大于直流负载功率,此时储能电池 SOC 增大,功率由直流母线流向储能电池;在 1.5~2.0 s 时光伏输出功率等于直流负载功率,此时储能电池 SOC 不变;在 2.0~2.5 s 时光伏输出功率小于直流负载功率,此时储能电池 SOC 减小,其负载功率缺额由储能电池提供。因为对储能单元的合理充放电控制,所以直流母线电压基本稳定在 500 V。

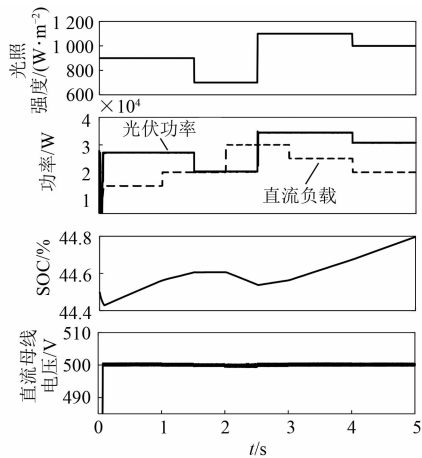


图 6 波动光伏和变直流负载仿真结果

图 7 显示了恒定直流负载和交流负载变化时的仿真结果。在 0.25 s 时光伏输出功率从 25 kW 增加到 35 kW,直流侧负载保持 30 kW,而交流侧于 0~0.2 s 和 0.35~0.50 s 时分别接入 50 kW 及 100 kW 恒定有功功率负载。当光伏功率在 0.25 s 增大时,储能电池转变为充电状态。在由电网和光伏提供负载功率的同时,储能电池会吸收多余的能量。只要负载需求小于光伏和电网的总功率,SOC 就会不断增加。直流母线电压在其额定设定值附近保持恒定。并网电流由于负载的影响,在 0.20 s 时减小,在 0.35 s 后又急剧增大。

图 8 为 0.2 s 前后参考电流和逆变器输出电流(跟踪值)的对比图,设置参考电流从 100 A 减小到 50 A。由图 8 可知跟踪值与参考电流之间的误差小于 4%,表现出较高的跟踪精确度,这也反应出代价函数的意义,即使跟踪值与参考值之间的误差最小。

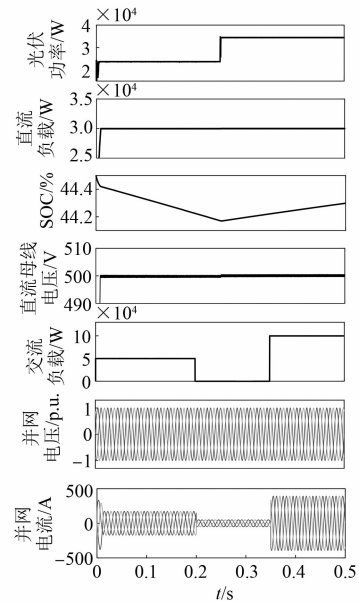


图 7 变交流负载仿真结果

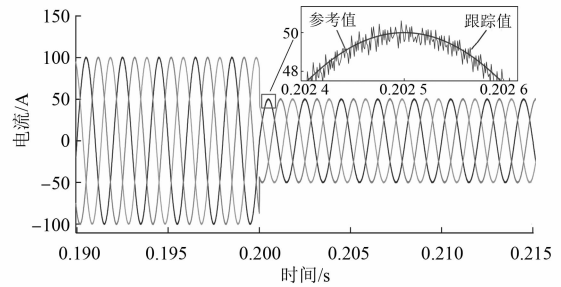


图 8 逆变器电流跟踪结果

并网电流谐波分析如图 9 所示。由图 9 可知,选取 0.35~0.45 s 时 A 相稳态并网电流的 6 个周期作傅里叶变换,对比 FCS-MPC 和传统 SVPWM 的并网电流总谐波畸变率(THD)情况。通过仿真分析,SVPWM 的 THD 为 2.12%,FCS-MPC 的 THD 为 1.28%。此外,在仿真用时上,相比传统 SVPWM 控制,本文所提方法仅为前者的 1/3。可见在负载

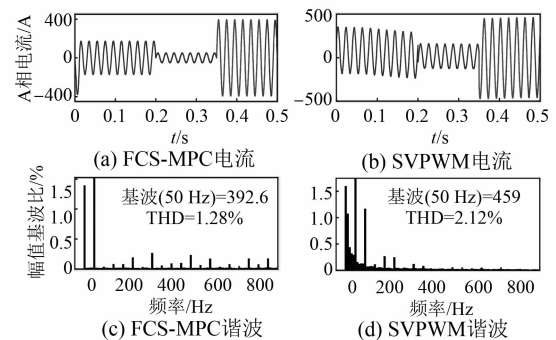


图 9 并网电流谐波分析

变换时,矢量角补偿的模型预测电流控制不仅响应速度快,且具有更好的动态控制效果。

4 结 语

本文针对微电网运行稳定性提出储能配置和逆变器预测控制方案。储能电池配合 PV,可最大限度消除波动光伏功率的影响,稳定直流母线电压。并网逆变器采用模型预测控制,逆变器输出电流作为成本函数控制量,并使用矢量角补偿法对预测过程进行延时补偿,提高了电流跟踪的收敛速度。对比分析传统控制和模型预测控制的电压电流响应,仿真结果显示所提方案在负载和光伏功率波动情况下,能提高直流母线电压稳定性,减小并网电流畸变率。

【参考文献】

- [1] 李一琳,董萍,刘明波,等. 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协调控制[J]. 电力系统自动化,2018,42(16): 96.
- [2] 刘舒,李正力,王翼,等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(3): 78.
- [3] KHULE S S,UGALE P D, MOHOD S W. Microgrid stability issues and PI control technique [C] //2018 International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET),2018.
- [4] KWON M, CHOI S. Control scheme for autonomous and smooth mode switching of bidirectional DC-DC converters in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(8): 7094.
- [5] 王擎宇,卢振坤,文国富,等. 应用于超级电容储能系统的双向 DC /DC 变换器混沌控制方法研究[J]. 电机与控制应用,2019,46(12): 81.
- [6] 宁佩. 30 kW 光伏并网逆变器的研究与设计[D]. 广州: 广东工业大学,2019.
- [7] 柳志飞,杜贵平,杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报,2017,32(22): 58.
- [8] JIN T, SHEN X, SU T, et al. Model predictive voltage control based on finite control set with computation time delay compensation for PV systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2019,34(1): 330.
- [9] 陆治国,王友,廖一茜. 基于光伏并网逆变器的一种矢量角补偿法有限控制集模型预测控制研究[J]. 电网技术,2018,42(2): 548.
- [10] SHAN Y, HU J, GUERRERO J M. A model predictive power control method for PV and energy storage systems with voltage support capability [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(2): 1018.
- [11] 程俊,肖先勇,马俊鹏,等. 三相储能型准 Z 源并网逆变器有限开关序列模型预测直接功率控制[J]. 电网技术,2020,44(5): 1647.
- [12] 岳改丽,徐志财. 基于扰动观察与模糊控制相结合的 MPPT 算法[J]. 电源技术,2017,41(1): 115.
- [13] 邱革非,张春刚,仲泽坤,等. 基于扰动观察法和电导增量法的光伏发电系统 MPPT 算法研究综述[J]. 中国电力,2017,50(3): 154.
- [14] SHAN Y, HU J, CHAN K W, et al. Model predictive control of bidirectional DC-DC converters and AC/DC interlinking converters; a new control method for PV-wind-battery microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2019,10(4): 1823.
- [15] 金楠,胡石阳,崔光照,等. 光伏并网逆变器有限状态模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(增刊1): 190.
- [16] 王友. 三相电压型逆变器的有限控制集模型预测控制研究及应用[D]. 重庆: 重庆大学,2018.
- [12] 杨丽伟. 牵引电机的温度场分析[D]. 北京:北京交通大学,2007.
- [13] 丁文,周会军,鱼振民. 基于 ANSYS 的开关磁阻电机温度场分析[J]. 微电机,2005,38(5): 13.
- [14] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,1997.
- [15] 孔春祥,付敏. 水轮发电机转子中部最热段三维温度场的有限元计算[J]. 哈尔滨科学技术大学学报,1996,1(4): 53.
- [16] 焦晓燕. 无刷双馈电机二维全域多工况温度场的分析与计算[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [17] 陈中成. 可控励磁直线磁悬浮同步电动机的优化设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [18] 冯良坤. 高推力密度圆筒型永磁直线电机温度场分析及改进设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.
- [19] 智淑亚,吴洪兵. 数控进给伺服系统摩擦补偿控制仿真[J]. 沈阳工业大学学报,2019,41(4): 361.

(上接第 59 页)