

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181431

基于模型预测控制的微电网逆变器控制方法研究

董润楠, 刘石, 梁庚, 安馨

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对微电网内负荷随机性大和网内分布式电源对负荷变化敏感度高的问题, 利用模型预测控制中的动态矩阵预估控制对适用于微电网这一特点的专用逆变器输出控制器进行改进。对传统分布式发电系统的并网逆变器内部控制结构在保留传统功率控制器的基础上, 利用基于模型控制的动态矩阵预估控制方法设计了模型预测控制器来替代传统控制结构中交流侧的电压环、电流环输出控制器和直流侧电压控制器。仿真实验验证了该逆变器控制方法提高了逆变器控制器的动态响应速度, 改善了传统控制器的超调、振荡、稳态误差等问题, 逆变器内部控制系统的动态性能得到提升。

关键词: 逆变器; 模型预测控制; 动态特性; 微电网; 分布式发电

Research on control method of special inverter in micro-grid based on model predictive control

DONG Runnan, LIU Shi, LIANG Geng, AN Xin

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the problem of high randomness of load and high sensitivity of distributed power supply to the load changes in the micro-grid, the special inverter output controller, which is applicable to the characteristic of the micro-grid, is improved through the dynamic matrix predictive control in model predictive control theory. For the internal control structure of the grid-connected inverter in the traditional distributed generation system, the traditional power controller is retained, and a model prediction controller is designed through the model-control-based dynamic matrix predictive control method to replace the voltage loop and current loop output controller at AC side and the voltage controller at DC side in the traditional control structure. It is proved in the simulation experiment that this inverter control method enhances the dynamic response speed of the inverter controller, improves the overshoot, oscillation and steady-state error of the traditional controller, and promotes the dynamic performance of the internal control system of the inverter.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61571189) and 111 Project of State Administration of Foreign Experts (No. B13009).

Key words: inverter; model predictive control; dynamic characteristics; micro-grid; distributed generation

0 引言

近些年随着国家能源战略调整, 以光伏发电为主的分布式可再生能源得到了快速发展。作为分布式资源管理的最有效解决方案^[1], 微电网技术得到了社会各界的广泛关注、研究和发展。微电网系统最大的特点在于其对分布式电源的灵活管理和其多种工作模式的灵活切换^[1]。随着微电网技术的研究和发展逐步完善, 现代微电网逐步趋向于多种类电

源^[2]、多种类负荷^[3-4]、多级复杂电网络结构^[5]、多级控制系统结构^[6]和多微电网互动^[7-8]等技术的融合。为保证网内供电的灵活性、可靠性和稳定性, 研究改善和提升网内底层设备控制系统的控制性能逐步成为了微电网发展的关键技术^[9]。

微电网控制系统的底层核心是分布式电源并网逆变器的控制系统^[10]。由于网内的分布式电源种类多样, 各种类型电源均需通过整流逆变设备(如DC-AC或AC-DC-AC)接入网内^[11], 因此, 作为网内分布式电源并网的接口设备(即Voltage/Current Source Inverter, VSI/CSI), 研究逆变器的内部控制器和多逆变器集群的协调控制策略将有助于提升系统

的动态特性和可靠性。微电网系统内的微电源供电以网内本地就近消纳为原则^[10-12]，但由于较强的微电源间歇特性、较低的惯性阻尼特性和较强的负荷随机特性导致微电源对负荷变化和外部环境变化的敏感度较高^[13]。众所周知，VSI/CSI的内部控制可分为功率控制器和输出控制器两部分。其中功率控制器主要针对反映实时功率情况的指标(如：电压、频率、相位等)的变化情况进行功率分配控制，由于VSI/CSI的低阻尼特性，对其控制性能要求具有较高的鲁棒性；而输出控制器则主要根据功率控制器的输出指令进行变换电路具体输出的控制调节，因此对输出控制器性能要求具有较高的动态响应能力。在微电网特殊的源-荷特性和对VSI/CSI控制器性能特殊的需求背景下，研究逆变器控制方法的难点在于既保证控制系统的鲁棒性又提升其底层VSI输出控制的动态响应速度。然而，由于传统微电网控制系统是由大量PI控制器组成的复杂PI控制网络，其继承了PI控制器无法消除稳态误差、超调、振荡和波动的特点，使得微电网控制系统底层响应性能的改善难度较大。

因此，本文针对微电网内逆变器输出控制器的动态特性要求进行研究，利用模型预测控制的方法对逆变器传统控制系统的内部控制结构进行改进以提高逆变器输出控制的动态特性。通过对改进的控制系统进行阶跃响应的仿真实验和引入实际系统运行数据的仿真对比实验，验证了基于模型控制方法的改进控制系统的动态特性得到明显提升。

1 传统分布式电源逆变器控制系统分析

现代微电网已形成了包含外部监督管理、上级能量管理、二级误差控制和底层设备控制的多层控制体系。而作为底层设备控制的关键——逆变器的控制系统研究尤为重要。逆变器内部控制系统主要包括功率控制器和双环输出控制器(即电压外环和电流内环控制)。如图1(a)所示为典型的三相两级式逆变器内部电路和控制系统结构示意图。目前针对微电网的逆变器控制方法研究主要集中于逆变器中的功率控制器的控制策略方法，如电压频率(V-f)控制^[14]，有功-无功功率(P-Q)控制^[11]，功率下垂控制^[15]、虚拟同步控制等控制方法^[16]以及集群控制策略中的对等控制^[17]和主从控制^[18]。针对逆变器输出电路的研究主要集中于其基础电路的拓扑结构方面^[19]，而针对其电流、电压输出的控制方法研究则相对较少。

传统逆变器的功率控制器和VSI输出控制器结构是由PI控制器构成的并级控制和串级控制相结合

的控制结构^[20]。尽管多层控制体系下，不同层级的控制时域不同，但二级控制与底层逆变器依然构成了复杂的多PI控制网络。如我们所知，PI是一种结构简单的经典控制器，其在多个领域得到了广泛的应用，但其较大的稳态误差、超调、振荡、动态响应速度慢和参数难以整定的特点依然限制了微电网底层控制节点的动态性能^[21]，且这些缺陷在复杂多PI控制器构成的控制网络中尤为突出^[22-24]。针对这些问题，文献[25]从控制参数、通信延迟等方面详细分析了多PI控制器影响复杂控制网络控制性能的原因，并采用了基于神经网络整定PI控制器参数和统一通信时间一致性的方式来改善控制网络的性能。然而在复杂控制网络中多PI控制器的参数整定需要综合考虑被控对象的整体特性。在频域下，当PI控制器所构成的控制系统穿越频率过大则导致系统鲁棒性下降、灵敏度增加，致使系统在系统误差和噪声干扰下出现失稳情况，而穿越频率过小则导致系统稳态误差和低频误差无法满足需求^[24-25]。传统工程上采用的离线参数整定方法在多组PI控制器构成的复杂结构中控制参数整定难度较大^[26]。如ALSAEDIW等提出的基于粒子群优化算法的逆变器PI控制器参数进行优化设计的方法提升了逆变器的动态性能^[27]。但由于未考虑二级控制构成的复杂控制结构，其实际应用中参数整定效果受到限制。

逆变器控制的另一研究方向为利用模型预测控制方法设计逆变器的控制系统^[28-29]。与传统的PI-PWM控制器和IMC-PID控制器的控制性能相比，基于模型预测控制方法设计的控制器具有振荡周期少、无超调、控制响应速度快等动态性能优势^[30-31]。但由于微电网中负荷变化随机性较大，采用模型预测控制的方法需对逆变器内部逆变主电路和外部负荷功率模型进行整体设计和构建模型，其难度较大，难以满足微电网内部的源-荷关系特性^[29]。然而，若仅针对底层VSI/CSI的输出控制采用模型预测控制方法，将大大降低模型构建的难度。同时在不改变原有二级功率分配控制的鲁棒性、稳定性的前提下，提高底层输出响应的动态性能。

2 逆变电路模型和特性分析

结合传统逆变器控制结构特点，利用模型预测控制的控制方法构建如图1(b)所示的电流电压控制器替代传统控制系统中的电压控制环、电流控制环和直流侧电压控制器，用基于模型预测控制的控制器作为传统功率控制器的执行器串级到逆变器的控制系统中，可大大降低PI控制网络中的PI控制器的数量。由于二级控制的控制时域和采样时间是秒

级, 而底层控制的控制时域和采样时间为毫秒级^[32], 因此可将二级控制过程视作底层控制的多个阶跃响应组合。本文仅针对逆变电路进行建模, 将二级控制给出的输出值和功率控制器的功率设定值视为底层控制的目标设定值, 从而对底层 VSI 的输出进行预测控制, 可在降低预测模型构建难度和发挥传统功率控制的性能优势的同时提升底层输出控制的动态响应性能。

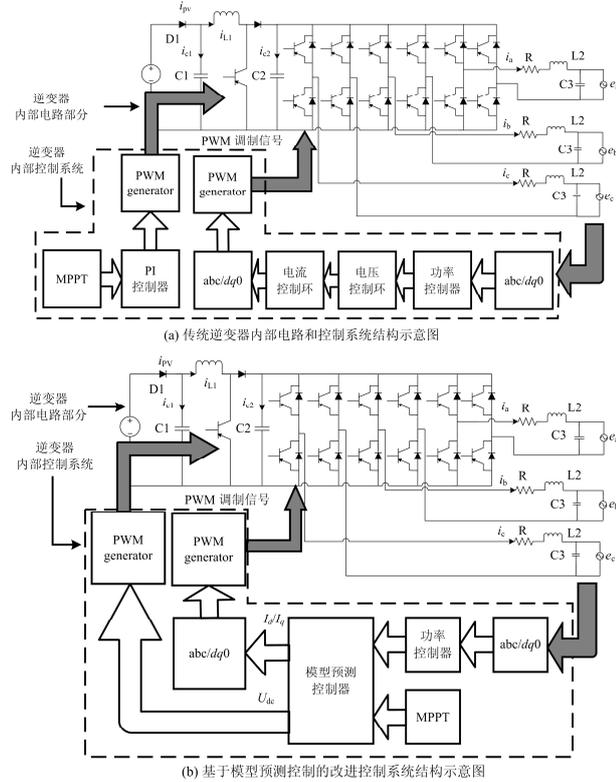


图 1 传统三相两级式逆变器内部电路和控制系统示意图
Fig. 1 Structure diagram of the typical three-phase two-stage inverter internal circuit and control system

尽管逆变器的拓扑电路结构较多, 但电路的数学模型构建思路相同^[19]。以典型的三相两级式逆变电路为例(如图2所示)。在传统的逆变器内部控制器分析过程中大多数采用直流侧和交流侧分离, 分别通过PI控制器构建控制系统。由于直流侧电压控制与交流侧输出控制对象模型上构成串级结构, 传统系统中的单独控制方式, 忽略了其自身控制性能的相互影响。本文对此进行了优化处理, 用直流侧和交流侧整体电路结构来构建状态空间模型并进行解耦, 从而构建出用于作为参考轨迹预测的参考模型。

由节点电压电流回路方程, 可以得到直流侧:

$$\frac{du_{pv}}{dt} = \frac{i_{pv}}{C_1} - \frac{i_{L1}}{C_1} \quad (1)$$

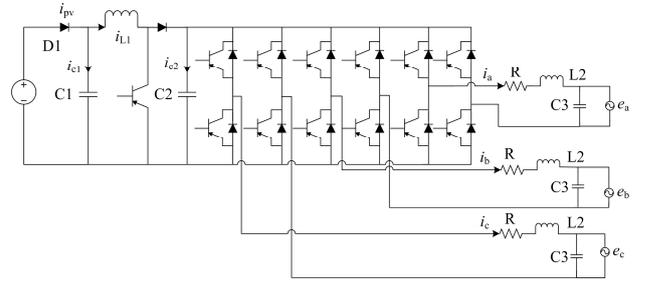


图 2 经典三相两级式逆变器内部逆变电路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of internal inverter circuit of typical three-phase two-stage inverter

$$\frac{du_{L1}}{dt} = \frac{U_{pv}}{L_1} - \frac{S_k \cdot U_{dc}}{L_1} \quad (2)$$

交流侧:

$$U_a = i_a R + L_2 \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (3)$$

$$U_b = i_b R + L_2 \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (4)$$

$$U_c = i_c R + L_2 \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (5)$$

$$C_3 \frac{du_{dc}}{dt} = i_{ES} - (i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c) \quad (6)$$

式中: 参数 e_a 、 e_b 、 e_c 分别为逆变器在并网点获取的交流母线电压参考值; i_{ES} 可以表示如式(7)。

$$i_{ES} = S_{k1} i_{L1} - C_2 \frac{du_{dc}}{dt} \quad (7)$$

上述式(3)一式(6)通过abc-dq0变换后如下:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{Ri_d}{L_2} + \omega_0 i_q + \frac{A_d U_{dc}}{L_2} - \frac{e_d}{L_2} \quad (8)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{Ri_q}{L_2} - \omega_0 i_d + \frac{A_q U_{dc}}{L_2} - \frac{e_q}{L_2} \quad (9)$$

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{C_3 S_k i_{L1}}{C_3 + C_2} - \frac{C_3}{C_3 + C_2} (i_d A_d + i_q A_q) \quad (10)$$

对上述式(8)一式(10)进行分析及处理, 并引入微电网母线电压变化补偿系数 K , 该补偿系数具有缩短控制系统调控时间、并能够直观反映网内电能质量变化的特性。上述式(8)一式(10)可变形为

$$\left[i_d + \frac{L_2 \frac{di_d}{dt} + Ke_d}{2R} \right]^2 + \left[i_q + \frac{L_2 \frac{di_q}{dt} + Ke_q}{2R} \right]^2 = \quad (11)$$

$$\frac{4Ru_{dc}(i_{ES} - C_3 \frac{du_{dc}}{dt}) + (L_2 \frac{di_d}{dt} + Ke_d)^2 + (L_2 \frac{di_q}{dt} + Ke_q)^2}{4R^2}$$

通过式(11)进一步可得到P-Q圆的关系式为

$$\left[P + \frac{3Ke_d L_2 \frac{di_d}{dt} + 3K^2 e_d^2}{4R} \right]^2 + \left[Q - \frac{3Ke_d L_2 \frac{di_q}{dt}}{4R} \right]^2 = \frac{36RK^2 e_d^2 U_{dc} (i_{ES} - C_3 \frac{du_{dc}}{dt}) + (3Ke_d L_2 \frac{di_d}{dt} + 3K^2 e_d^2)^2}{16R^2} + \frac{(3Ke_d L_2 \frac{di_q}{dt})^2}{16R^2} \quad (12)$$

根据式(12)可知其工作在以 $A(K)$, $B(K)$ 为圆心A, 以 $R(K)$ 为半径的P-Q圆内, 其中:

$$A(K) = -\frac{3Ke_d L_2 \frac{di_d}{dt} + 3K^2 e_d^2}{4R} \quad (13)$$

$$B(K) = \frac{3Ke_d L_2 \frac{di_q}{dt}}{4R} \quad (14)$$

$$R(K) = \frac{\sqrt{36RK^2 e_d^2 U_{dc} (i_{ES} - C_3 \frac{du_{dc}}{dt}) + (3Ke_d L_2 \frac{di_d}{dt} + 3K^2 e_d^2)^2 + (3Ke_d L_2 \frac{di_q}{dt})^2}}{4R} \quad (15)$$

可将上述式(12)所描述的P-Q圆对应至不同的工作模式下, 则可得到如图3所示的P-Q圆示意图。

图3中A1为微电网并网模式下P-Q圆示意图, A2为微电网孤岛模式下P-Q圆示意图, 虚线为随着微电网PCC并网点至母线侧电压变化补偿系数K的变化而引起的P-Q圆的变化极限包络线, 即微电网光伏支路中经由逆变器输出的功率值落在此包络线范围以内。可绘制PQ圆的极限包络线如式(16)所示。

$$\begin{cases} P(K) = R(K) \cos \theta + A(K) \\ Q(K) = R(K) \sin \theta + B(K) \end{cases} \quad (16)$$

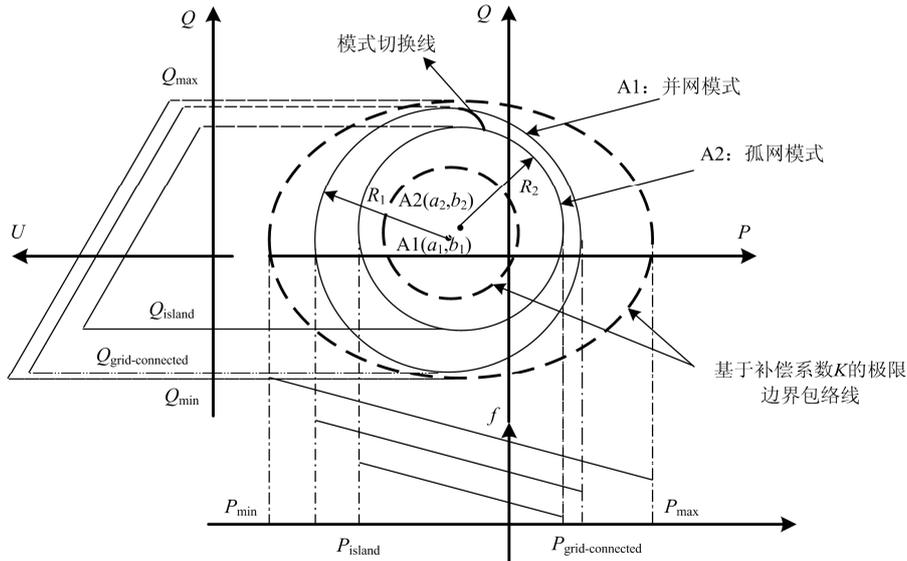


图3 P/f-Q/U和包含K补偿包络线的P-Q圆

Fig. 3 P/f-Q/u circle with K compensation envelope

由于 K 为微电网交流主母线至并网 PCC 侧电压变化补偿系数, 故根据 IEEE1547 标准控制器动态响应过程中调控目标要求, 即式(16)中以 $P(K)$ 、 $Q(K)$ 所表示的圆中 K 的取值为 $0.8 \leq K \leq 1.2$ 。根据 K 的取值范围对式(16)进行求导, 即可得到 VSI 依据并网电能补偿系数的实时边界包络线状态。得到的包络线和 K 的取值范围可作为后文模型预测控制器滚动优化过程中的最优约束条件使用。

3 VSIs 模型预测控制器

通过比较分布式电源的发电特性和不同模型

预测控制算法的特点, 为避免构建微电网不同工况的复杂模型, 降低控制系统的复杂度, 对逆变器底层电路的双环控制器进行了重新设计, 如图4所示为微电网系统基于DMC控制VSI协调控制结构框图, 该控制结构由底层的基于DMC控制的VSI接口和二级控制构成。常规模型预测控制方法主要包含输出变量目标设定值、对象模型的参考轨迹、控制器、滚动优化、反馈和误差校正部分。模型预测控制的原理是通过同样的输入控制量对比实际系统和拟合拓扑模型的输出预测值来构建误差修正矩阵并对未来 k 步的输出预测进行修正。为了降低控制器计算

的复杂度, 本文采用从对象的理论模型的阶跃响应特性曲线中提取特征值来构建参考轨迹。改进的新型逆变器控制系统结构框图如图5所示。系统采用传统功率控制器, 根据VSI并网点检测电流、电压值

在功率控制器上计算出改进控制器输出控制的 I_d^* 、 I_q^* 目标值, 计算结果作为改进控制器的控制目标设定值。逆变器内部输出控制器根据该目标设定值进行基于DMC控制方法的输出功率的调整控制。

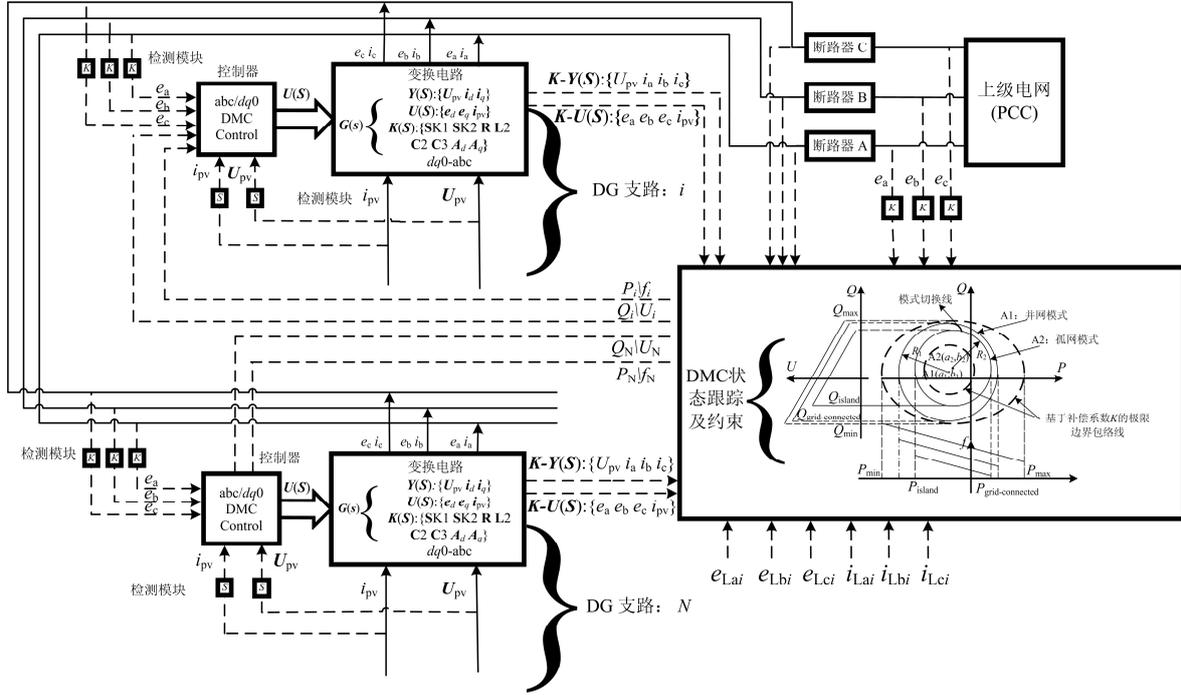


图 4 基于改进逆变器内部控制的微电网底层控制架构图

Fig. 4 Primary control structure diagram based on the improved internal control structure of inverter

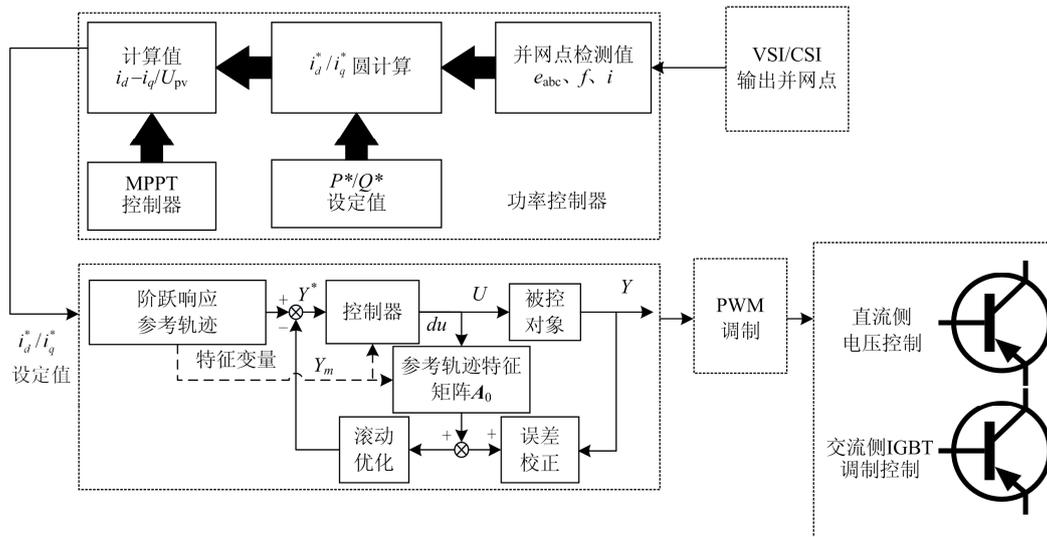


图 5 改进逆变器内部控制框图

Fig. 5 Internal control structure of the improved inverter

3.1 参考轨迹

参考轨迹是预测控制模型的输出响应期望值, 通常采用被控对象的理论模型进行参考轨迹的构

建, 因此对象模型的构建对模型预测控制器的控制性能影响巨大。在参考文献[33]中对VSI的广义对象模型进行了详细建模和分析, 并提出了如式(17)所

示的广义VSI的控制模型。

$$G(z) = \frac{1}{b} \cdot \frac{1 - 2\xi \cos(\omega_0 \Delta) z^{-1} + \xi^2 z^{-2} + \xi z^{-1} (1 - z^{-1})}{1 - 2\xi \cos(\omega_0 \Delta) z^{-1} + \xi^2 z^{-2}} \quad (17)$$

式中: $b = \frac{1}{R} (1 - e^{-\frac{\Delta}{\tau_p}})$, $\tau_p = \frac{1}{f_0} = 2\pi\sqrt{LC}$, Δ 为控

制器采样时间; ξ 为控制模型的阻尼系数; ω_0 为系统模型基波分量^[33]。

利用文献[33]的建模方法对式(17)加入延迟和干扰噪声后,根据式(6)一式(8)可以构建出对象模型的状态空间模型为

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k = Cx_k + T + S \end{cases} \quad (18)$$

式中: T 为模型延迟; S 为模型干扰噪声,将其转换为被控对象的传递函数可表示为

$$G(z) = \frac{a^2(1 - 2\xi \cos(\omega_0 \Delta) z^{-1} + \xi^2 z^{-2}) + \xi(1 - z^{-1})}{b(1 + az^{-1})(1 - 2\xi \cos(\omega_0 \Delta) z^{-1} + \xi^2 z^{-2})} \quad (19)$$

$$S(z) = \frac{(1 - 2\xi \cos(\omega_0 \Delta) z^{-1} + \xi^2 z^{-2})(1 - a^2 z^{-2})}{1 - 2\xi \cos(\omega_0 \Delta) z^{-1} + \xi^2 z^{-2} + \xi z^{-2} (1 - z^{-1})} \quad (20)$$

$$T(z) = \frac{z^{-2}[a^2(1 - 2\beta \cos(\omega_0 \Delta) z^{-1} + \beta^2 z^{-2}) + \xi(1 - z^{-1})]}{1 - 2\beta \cos(\omega_0 \Delta) z^{-1} + \beta^2 z^{-2} + \xi z^{-2} (1 - z^{-1})} \quad (21)$$

式中, $\beta = b(1 - z^{-1})$ 。

利用上述式(18)一式(21)所描述的被控对象理论模型的阶跃响应曲线并采样可得到构建参考轨迹特征矩阵 A_0 ,如式(22)所示。

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (22)$$

对象模型的预测输出值更新公式可如式(23)所示。

$$y_n(k+1) = y_m(k) + A_0 \cdot du(k) \quad (23)$$

式中, $y_m(k)$ 是上一次采样时模型预测输出误差校正值。

3.2 滚动优化

滚动优化部分采用从每一采样时刻开始到未来 n 步的预测值的在线滚动优化。其目标在于使控制系统预测值输出尽可能接近未来 n 步的期望设定值。因此需要设置模型输出的目标函数来求解最优输出值所需的控制量。

$$\min J_k = \|y_k^* - \hat{y}_{k+n}\| \quad (24)$$

式中: y_k^* 为系统模型 k 时刻的输出期望值; \hat{y}_{k+p} 为 k 时刻之后未来 n 步的预测输出值。

由于模型误差和实际操作过程中的干扰,需要在预测模型的基础上对控制器的控制量进行修正,修正方法如下面两式所述。

$$du(k) = (A_0^T Q A_0 + R)^{-1} A_0^T Q [y_m(k+1) - y_{sp}] \quad (25)$$

$$U(k+1) = U(k) + du(k) \quad (26)$$

式中: Q 表示系统的误差加权矩阵; R 表示系统的控制加权矩阵。 Q 和 R 的值采用理论模型预先设定(如式(27)),实际运行过程中根据如下约束要求进行修正的形式。约束要求:校正后的 $U(k)$ 需要满足式(16)中 K 的取值范围,即要求 $U(k)$ 的值始终落于图3所示的内外两条临界包络线范围之内,且满足式(12)所述的P-Q圆上。若不满足则需要返回,通过修正误差加权矩阵 Q 和控制加权矩阵 R 重新计算 $du(k)$ 的校正值。

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & q_1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & r_1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

3.3 反馈校正

实际输出和预测输出之间的系统误差可以用式(28)表示。

$$e(k) = y(k) - y_n(k) \quad (28)$$

可以通过引入系统误差校正矩阵 H 并移动系统的预测校正输出值来获得式(29)和式(30)。

$$y_{\text{cor}}(k+1) = y_n(k) + H \cdot e(k) \quad (29)$$

$$y_m(k+1) = S_0 \cdot y_{\text{cor}}(k+1) \quad (30)$$

式中, S_0 为系统移位矩阵。

4 仿真分析

4.1 阶跃响应仿真对比

为了验证改进后的逆变器输出控制器比传统由双环PI控制结构构成的控制器具有更好的动态响应特性,本文进行了两种控制器控制同一种三相逆变电路拓扑对象模型的对比仿真。仿真过程中采样时间为0.000001s,输入信号在0到0.5s设定为700A,在0.5到1s设定为750A,交流频率为50Hz。图6所示为传统PI控制结构下的仿真控制输出曲线,图7所示为改进后的控制器仿真控制曲线。

在仿真阶段前0.3s为控制系统从0A调整为700A的系统启动控制阶段。从图6可以看出,传统控制结构的输出在前10个周期即0到0.2s时间段内处于上升调整阶段,之后达到稳定;在0.5s时系统设定值从700A变化为750A,产生阶跃响应,PI控制结构在0.5s到0.6s间处于调整阶段,0.6s后达到稳定,如图6中0.4s到0.65s时段放大曲线所示。

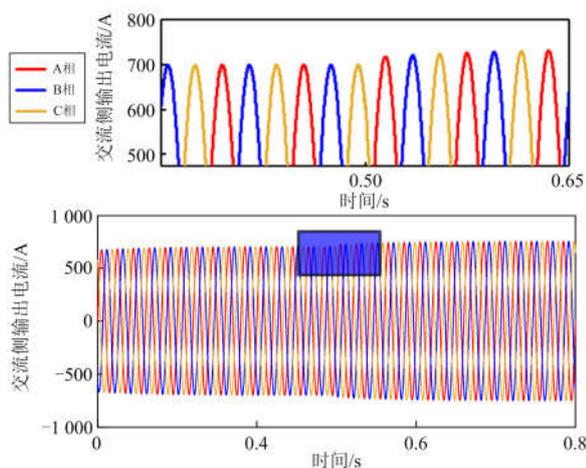


图6 传统双环PI控制结构的阶跃响应仿真曲线

Fig. 6 Step response simulation curves of traditional double-loop PI control structure

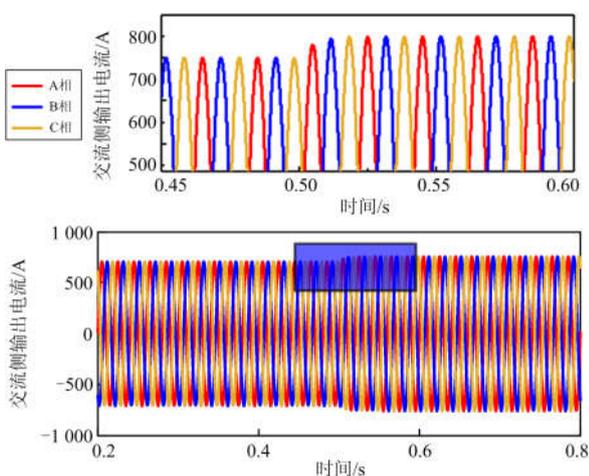


图7 改进的逆变器输出控制器阶跃响应仿真曲线

Fig. 7 Step response simulation curves of improved controller of inverter

在相同的设定值、电路模型和仿真环境下,改进的电路输出控制器的输出曲线如图7所示。从图7中可以看出,在系统的启动阶段,即从0 A到700 A的上升响应阶段,控制器响应控制输出的曲线仅用2个周期,即0.04 s即完成控制调整。而在0.5 s时刻的阶跃响应过程中,从0.4 s到0.65 s的放大曲线可以看出,改进控制器用时0.04 s,即2个工频周期即完成系统的阶跃响应调整,与传统PI构成的双环控制结构调整周期为5个工频周期相比,改进控制器的动态响应调整控制的响应速度更快,且无超调和稳态误差。

图8所示为上述仿真过程中A相曲线的设定值和两种控制系统输出的曲线对比图,可以看出改进

控制器在设定值变化后的2个工频周期内即实现了动态调控响应,而图中传统的PI控制系统在设定值改变后的5个工频周期后才达到稳定。在稳定状态下,从0.4 s到0.5 s阶段改进控制器的仿真控制稳态误差均值可忽略不计,而传统PI控制结构的稳态误差均值为0.028%。

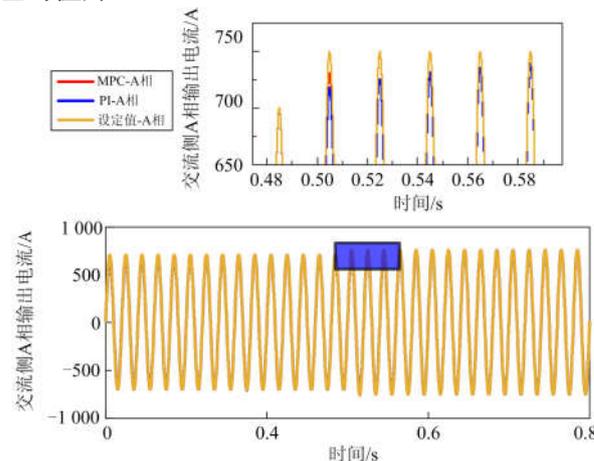


图8 阶跃响应A相输出设定值、PI控制输出和改进控制器的控制输出对比曲线

Fig. 8 Step response a phase output set value, PI controller output and improved controller output contrast curves

4.2 实际运行数据仿真对比验证

为了验证3.1节中阶跃响应仿真得到的结果在实际系统中产生的区别,本文采用2 MW分布式光伏发电系统中的500 kW逆变器实际运行的全天数据进行仿真验证。图9所示为改进后逆变器控制器与传统PI控制器的直流侧输出电压对比曲线。

从图9中放大的任意一段时间的曲线中可以看出,改进控制器控制曲线与设定值曲线基本重合,表明动态调整过程中,改进控制器的响应速度较快,且无明显稳态误差情况出现。但PI输出曲线在系统设定曲线动态调整变化剧烈时出现了明显的稳态误差情况。从8:06到8:10的设定值动态调整上升阶段的放大曲线可以看出,实际运行设备的输出曲线稳态误差均值为8.7 V,而该放大时段的改进控制器的控制输出的稳态误差均值为0.9 V。

图10为实际运行中逆变器输出电流经过Park变换后的设定值d轴分量的对比曲线。从全天运行曲线的整体趋势看,两种控制器都能较好地跟踪设定值曲线,动态响应速度均较快。放大其中任意一段时间,如图所示,放大时间段为从11:49到12:05,可以看出在曲线11:49前后的动态调整较为剧烈,传统控制系统具有明显稳态误差,之后稳态误差逐渐缩小,而改进控制器的控制输出曲线则与设定值曲线

基本重合。经计算,该放大时间段内,电流 d 轴分量的传统控制输出曲线的稳态误差均值为0.34 A,而改进控制器的控制输出曲线的稳态误差均值为0.03 A。

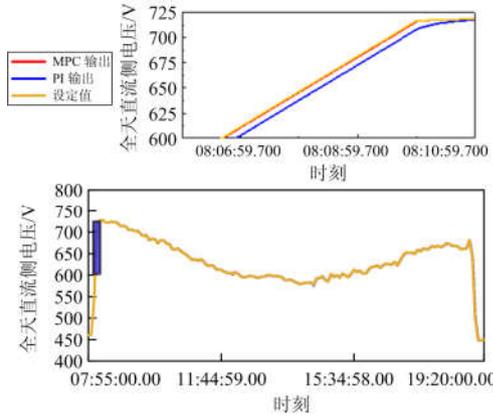


图9 实际运行直流侧电压设定值、PI控制输出与改进控制器仿真输出对比曲线

Fig. 9 Actual running DC side voltage setting value, PI controller output and improved controller simulation output contrast curve

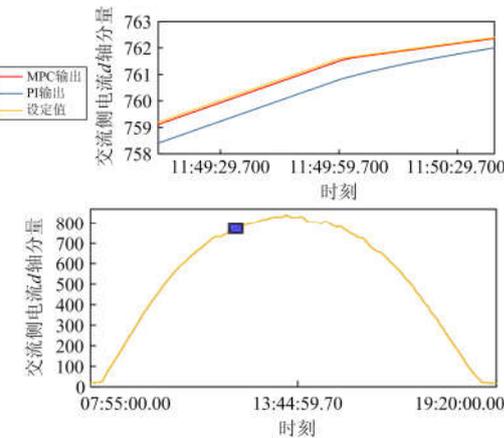


图10 逆变器实际运行数据的 d 轴分量设定值、PI控制输出和改进控制器的控制输出对比曲线

Fig. 10 d -axis component setting value, PI controller output and improved controller output contrast curve of the inverter actual operation data

由于Park变换后 q 轴分量通常为0,如图11所示为 q 轴分量的三种对比曲线,尽管设定值为0,但当动态调整过程中,由于对象具有较强的耦合特性,从 q 轴输出曲线可以看出,系统的解耦情况和动态调整过程中 d 轴剧烈变化时 q 轴的特点。同样放大任意时间段曲线可以看出传统控制器的输出具有较明显的超调,而改进控制器的控制输出则无明显波动和超调,通过图9、图10、图11可以验证改进后的控制

器较传统的双环PI控制结构具有非常明显的动态性能优势,满足微电网分布式电源对变化负荷的高敏感性特点,可作为微电网中分布式电源接入的统一接口设备控制器。

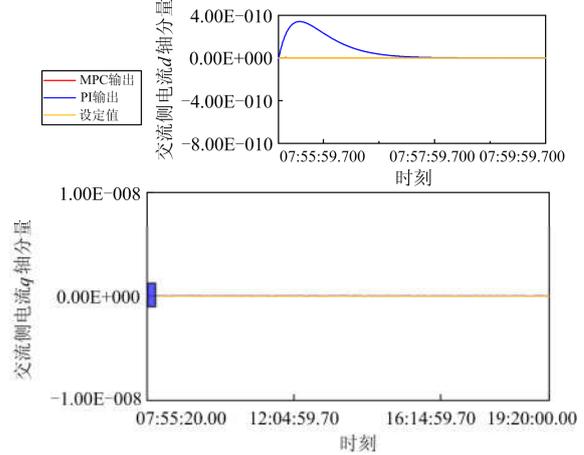


图11 逆变器全天运行交流侧输出电流 q 轴分量设定值、PI控制输出和改进控制器的控制输出对比曲线

Fig. 11 Inverter all day running AC measurement output current q axis component setting value, PI controller output and improved controller output contrast curve

5 结论

本文利用基于模型预测控制的控制方法设计了用于替代传统的双闭环PI控制结构的逆变电路输出控制器。由于逆变器的拓扑电路结构较多,本文采用经典的三相两级式电路构建模型,实际应用中可根据不同电路拓扑采用相同建模方法构建模型和参考轨迹特征矩阵。阶跃响应的仿真验证了改进控制系统的动态响应时间为2个工频周期,低于由传统PI控制器构成的控制系统的5个工频周期,逆变器的控制系统动态响应速度得到提升。传统PI控制器在阶跃响应过程中达到稳定状态时,稳态误差均值为0.028,而基于模型预测控制的控制系统达到稳定过程时其稳态误差为0.000 13,改进逆变器底层控制系统有效地降低了逆变器内部控制系统的稳态误差。该改进设计将基于模型控制设计的底层电路控制器与传统的功率控制器相结合,使其在继承了传统逆变器对微电网负荷随机变化过程中的功率调控特点的同时有效提升了逆变器的动态响应特性。

不可否认的是较传统输出控制器而言,其对底层芯片的计算处理速度和对电路元件参数的准确性要求也更高,但该改进的控制器较传统多PI控制器的动态响应速度更快,动态性能更优。尽管现阶段可作为VSI接口设备的逆变整流电路的拓扑结构较多,但作为被控对象的电路模型构建方法相同,因

此该改进方法具有一定的普适性。

参考文献

- [1] RAJESH K S, DASH S S, RAJAGOPAL R, et al. A review on control of AC microgrid[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71: 814-819.
- [2] 蔡志远, 戈阳阳, 李洋, 等. 多微电源混合系统在微电网中最优定位和规划研究[J]. *电机与控制学报*, 2017, 21(5): 42-50.
- CAI Zhiyuan, GE Yangyang, LI Yang, et al. Optimal placement and schedule of hybrid energy management system in microgrid[J]. *Electric Machines and Control* 2017, 21(5): 42-50.
- [3] 唐巍, 高峰. 考虑用户满意度的用户型微电网日前优化调度[J]. *高电压技术*, 2017, 43(1): 140-148.
- TANG Wei, GAO Feng. Optimal operation of household microgrid day-ahead energy considering user satisfaction[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 140-148.
- [4] 陈冉, 杨超, 沈冰, 等. 基于微电网的需求响应优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11): 124-130.
- CHEN Ran, YANG Chao, SHEN Bing, et al. Micro-grid based demand response optimization policy[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(11): 124-130.
- [5] 陈健, 刘玉田, 张文, 等. 基于博弈论的配电网中多级微电网优化配置分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(1): 45-52.
- CHEN Jian, LIU Yutian, ZHANG Wen, et al. Optimal sizing analysis of multilevel microgrids in distribution network based on game theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(1): 45-52.
- [6] MENG L, DRAGICEVIC T, ROLDANPEREZ J, et al. Modeling and sensitivity study of consensus algorithm-based distributed hierarchical control for DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(3): 1504-1515.
- [7] TIAN P, XIAO X, WANG K, et al. A hierarchical energy management system based on hierarchical optimization for microgrid community economic operation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(5): 2230-2241.
- [8] 陈其森, 汪湘晋, 池伟, 等. 多微电网互联系统能量管理方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11): 83-91.
- CHEN Qisen, WANG Xiangjin, CHI Wei, et al. Research on energy management method of multi-microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(11): 83-91.
- [9] HUANG B, LI Y, ZHANG H, et al. Distributed optimal co-multi-microgrids energy management for energy internet[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, 3(4): 357-364.
- [10] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [11] OLIVARES D E, MEHRIZI-SANI A, ETEMADI A H, et al. Trends in microgrid control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(4): 1905-1919.
- [12] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [13] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [14] TAVAB U B, ROSLAN M A B, HWAI L J, et al. A review of droop control techniques for microgrid[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 717-727.
- [15] PLANS E, GIL-DE-MURO A, ANDREU J, et al. Design and implementation of a droop control in d-q frame for islanded microgrids[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2013, 7(5): 458-474.
- [16] SERBAN I, ION C P. Microgrid control based on a grid-forming inverter operating as virtual synchronous generator with enhanced dynamic response capability[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2017, 89: 94-105.
- [17] 王凌云, 周璇卿, 李升, 等. 基于改进功率环的微电网对等控制策略研究[J]. *中国电力*, 2017, 50(9): 171-177.
- WANG Lingyun, ZHOU Xuanqing, LI Sheng, et al. Research on peer-to-peer control strategy for microgrid based on improved power loop[J]. *Electric Power*, 2017, 50(9): 171-177.
- [18] 冯博豪, 余向阳, 明尧, 等. 基于主从控制微电网的状态跟随平滑切换控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2017, 33(3): 104-110.
- FENG Bohao, YU Xiangyang, MING Yao, et al. Control strategy of grid connected and isolated island switching for master slave control[J]. *Power System and Clean Energy*, 2017, 33(3): 104-110.
- [19] JANA J, SAHA H, BHATTACHARYA K D. A review of inverter topologies for single-phase grid-connected

- photovoltaic systems[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 1256-1270.
- [20] SANJARI M J, GHAREHPETIAN G B. Incomplete information-based decentralized cooperative control strategy for distributed energy resources of VSI-based microgrids[J]. *Neural Computing & Applications*, 2014, 25(1): 189-197.
- [21] LI X, CHEN M, TSUTOMU Y. A method of searching PID controller's optimized coefficients for buck converter using particle swarm optimization[C] // *IEEE International Conference on Power Electronics & Drive Systems*, April 22-25, 2013, Kitakyushu, Japan: 238-243.
- [22] 高家元, 赵晋斌, 陈晓博, 等. 电压并网逆变器的功率控制与设计[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(6): 1788-1798.
GAO Jiayuan, ZHAO Jinbin, CHEN Xiaobo, et al. Power control and design of voltage grid-connected inverter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(6): 1788-1798.
- [23] 高春风, 杨仁刚, 井天军. 独立微电网有功功率自主与协调控制[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 113-121.
GAO Chunfeng, YANG Rengang, JING Tianjun. Autonomous and coordinated control of active power in standalone microgrid[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 113-121.
- [24] 康晴, 罗奕, 卢新佳, 等. 基于变流器控制策略的微电网故障特性仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 147-153.
KANG Qing, LUO Yi, LU Xinjia, et al. Simulation study on microgrid fault characteristics based on converters control strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 147-153.
- [25] LIANG Geng, LI Wen. Some thoughts and practice on performance improvement in distributed control system based on fieldbus and Ethernet[J]. *Measurement and Control-London-Institute of Measurement and Control*, 2016, 49(3): 109-118.
- [26] AZIZ M A A, TAIB M N, ADNAN R. The effect of varying inertia weight on particle swarm optimization (PSO) algorithm in optimizing PID controller of temperature control system[C] // *IEEE International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, March 23-25, 2012, Melaka, Malaysia: 545-547.
- [27] ALSAEDI W, LACHOWICZ S W, HABIBI D, et al. Power flow control in grid-connected microgrid operation using particle swarm optimization under variable load conditions[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, 49(1): 76-85.
- [28] 高锋阳, 杜强, 乔垚, 等. 功率前馈的三相光伏并网逆变器模型预测控制[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(9): 2368-2376.
GAO Fengyang, DU Qiang, QIAO Yao, et al. Model predictive control for three-phase grid-connected inverters based on power feed-forward control[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(9): 2368-2376.
- [29] GULBUDAK O, SANTI E. FPGA-based model predictive controller for direct matrix converter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(7): 4560-4570.
- [30] LIM C S, LEVI E, JONES M, et al. A comparative study of synchronous current control schemes based on FCS-MPC and PI-PWM for a two-motor three-phase drive[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(8): 3867-3878.
- [31] RAMDANI A, GROUNI S. Dynamic matrix control and generalized predictive control, comparison study with IMC-PID[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(28): 17561-17570.
- [32] SILVIA M, ROBERT S, GONZALEZ-MEDINA R, et al. Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(3): 3610-3622.
- [33] MIRZAEVA G, GOODWIN G C, MCGRATH B P, et al. A generalized MPC framework for the design and comparison of VSI current controllers[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(9): 5816-5826.

收稿日期: 2018-11-15; 修回日期: 2019-03-19

作者简介:

董润楠(1988—), 男, 博士, 研究方向为微电网混合控制方法和特性、分布式发电系统控制方法和特性。

(编辑 魏小丽)