基于波动量自适应补偿的HCSY-MG系统并网电流模型预测控制

李锦键[1], 王兴贵[1†], 李 昱[1], 丁颖杰[1], 薛 晟[1,2]

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 在半桥变流器串联结构星型连接微电网(HCSY-MG)并网系统中, 可再生能源功率的波动将会引起并网电流中出现直流和基频波动量. 为解决以上HCSY-MG系统存在的特殊问题, 有针对性地提出一种基于波动量自适应补偿的并网电流模型预测控制策略. 在可再生能源存在随机波动的情况下, 得到HCSY-MG系统的并网电流表达式, 并对其特性进行分析. 从上述特性出发, 将并网电流表达式作为预测模型, 并使用混沌化和自适应思想对青蒿素优化算法进行改进, 提高滚动优化环节的寻优速度, 同时降低并网电流中包含的波动量, 提高控制效果与精度. 最后与现有方法进行仿真和实验对比, 验证了本文所提控制策略的可行性、有效性和针对性.

关键词: 微电网; 模型预测控制; 并网电流; 波动量补偿; 改进青蒿素优化

引用格式: 李锦键, 王兴贵, 李昱, 等. 基于波动量自适应补偿的HCSY-MG系统并网电流模型预测控制. 控制理论与应用, 2025, 42(12): 2517 – 2527

DOI: 10.7641/CTA.2025.40380

Model predictive control of grid-connected current in HCSY-MG system based on adaptive compensation of fluctuating quantities

LI Jin-jian[1], WANG Xing-gui[1†], LI Yu[1], DING Ying-jie[1], XUE Sheng[1,2]

(1. School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;
2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: In the grid-connected system of a half-bridge converter series Y-connection microgrid (HCSY-MG), fluctuations in renewable energy power will introduce DC and fundamental frequency fluctuation components in the grid-connected current. To address this specific issue in the HCSY-MG system, a grid-connected current model predictive control strategy based on adaptive compensation of fluctuation components is proposed. Under the condition of stochastic fluctuations in renewable energy, the grid-connected current expression of the HCSY-MG system is derived, and its characteristics are analyzed. Based on these characteristics, the grid-connected current expression is utilized as the predictive model, and the artemisnin optimization algorithm is improved using chaotic and adaptive mechanisms to enhance the search speed in the rolling optimization process. This approach effectively reduces the fluctuation components in the grid-connected current while improving control performance and accuracy. Finally, simulations and experimental comparisons with existing methods verify the feasibility, effectiveness, and specificity of the proposed control strategy.

Key words: microgrids; model predictive control; grid-connected current; volatility compensation; improved artemisinin optimization algorithm

Citation: LI Jinjian, WANG Xinggui, LI Yu, et al. Model predictive control of grid-connected current in HCSY-MG system based on adaptive compensation of fluctuating quantities. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(12): 2517 – 2527

1 引言

以光伏和风电为主的可再生能源发电不仅可以缓解一次能源紧缺的资源现状, 而且能够降低对环境的污染. 为充分利用可再生能源发电的技术、经济、环境优势, 微电网的概念在2001年由美国电力可靠性技术协会提出[1]. 微电网是一种将多个微源与负荷组合, 并且能为本地负荷提供电能的可控微型电力系统[2]. 微电网经过多年的发展, 其中的交流微电网凭借着与电力系统相同的供电方式, 具有更高的应用和研究价值. 但传统交流微电网中各逆变器采用的并联接入方

收稿日期: 2024−07−19; 录用日期: 2025−03−26 .
†通信作者. E-mail: Wangxg8201@163.com; Tel.: +86 931-2973506.
本文责任编委: 李德伟.
国家自然科学基金项目(51967011), 甘肃省科技计划项目(联合科研基金重点项目)(24JRRA1205), 甘肃省杰出青年基金项目(22JR5RA221)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51967011), the Gansu Provincial Science and Technology Project (Joint Research Fund Key Project) (24JRRA1205) and the Gansu Outstanding Youth Foundation Project (22JR5RA221).

式会使系统内部存在着谐波和环流难以抑制, 输出电能质量较差等问题[3–4]. 同时, 现有通过串联方式组成的微电网也不可避免地存在诸如系统内部环流难以抑制, 或微源利用率较低的缺点.

为解决或简化现有交流微电网中存在的问题, 有学者从拓扑结构出发, 提出一种半桥变流器串联星型结构微电网(half-bridge converter series Y-connection microgrids, HCSY-MG). HCSY-MG系统通过串联结构星型连接的方式将各微源半桥变流器组成三相逆变环节, 在拓扑结构层面上不仅解决了传统交流微电网中由于各变流器之间并联产生的环流问题, 而且提高了输出电压与电流中谐波的频率, 使谐波分量更容易被滤除. 同时, HCSY-MG系统采用的半桥变流器可以显著降低系统控制的难度, 提高各可再生能源的能量利用率[5]. 但该系统由于不存在公共直流母线, 所以各可再生能源的随机性和波动性会不可避免地影响HCSY-MG系统输出电压与电流. 针对HCSY-MG系统这一种新型的微电网系统, 目前仅有研究该系统在微源输出功率严重不平衡条件下的并网功率平衡控制策略[6], 但对其在可再生能源波动条件下并网电流的特性分析, 以及对应的控制策略却鲜有研究.

微电网在并网运行时, 由于其输出电压受电网电压控制, 故并网系统的控制目标是输出功率或电流随给定值变化[7]. 为获得谐波含量更少、跟踪误差更低的并网电流, 在交流微电网的并网逆变器中常用重复控制、非线性无源控制、模型预测控制等方法[8–10]. 其中, 模型预测控制(model predictive control, MPC)在应用至微电网控制及调度领域时, 具有以下优势: 有限时域内对目标函数进行优化, 滚动式地求解最优控制变量; 保持某控制时段内的最优, 而非全局最优, 以适应环境的不确定性[11]. 基于以上优势, MPC在非线性电力变换系统中得到了广泛应用[12], 例如与HCSY-MG系统拓扑结构类似的级联H桥变流器[13–14]、模块化多电平变流器[15–16]以及模块化多电平矩阵变流器[17]等. HCSY-MG系统作为一种新型的交流微电网系统, 当可再生能源的随机性和波动性造成各相发电模块直流侧电压之和发生波动时, 其并网电流会表现出独有的特征. MPC凭借其中的预测模型和滚动优化环节, 能更有针对性地解决具有不确定性因素的优化控制问题[18], 所以在应用至含有大量可再生能源的HCSY-MG系统并网电流控制领域中具有一定的优势.

尽管MPC在各领域都表现良好, 但其中滚动优化环节的快速性是制约其进一步发展的关键问题[19]. 文献[20]通过提出一种改进RRT*的优化算法, 显著加快了优化环节的收敛速度, 并基于MPC设计了航迹规划策略, 有效降低了无人机在线航迹规划任务中的代价. 目前, 滚动优化环节常用的优化策略有启发式优化算法、凸/非凸优化算法、混合整数二次规划、整数非线性优化等[21]. 其中, 随着启发式优化算法经过长时间发展, 收敛速度更快, 优化效果更优的算法已被提出, 可以更好地促进MPC在各场景的应用. 青蒿素优化(artemisinin optimization, AO)算法作为一种新型的元启发式优化算法, 随着被提出的同时, 在IEEE CEC 2014和2022基准函数测试集上与8种经典优化算法和8种高性能改进优化算法进行对比, 结果均显示AO算法有着更快的收敛速度和更好的寻优效果[22]. 所以, 为保证滚动优化环节的快速性, AO算法可以作为MPC中滚动优化环节的优化算法.

综上所述, 本文将以HCSY-MG并网系统为研究对象, 在微源出力随机性造成并网电流存在波动的情况下, 以并网电流数学模型和特性为基础, 提出一种波动量自适应补偿的并网电流MPC策略. 在MPC的滚动优化环节采用AO算法, 并以提升算法收敛速度和降低陷入局部最优风险为目的对其进行改进. 最后, 通过仿真和实验与由重复控制和PI控制构成的复合控制策略进行对比, 验证本文所提HCSY-MG系统并网电流MPC策略的有效性、可行性和针对性.

2 HCSY-MG并网系统及其特性

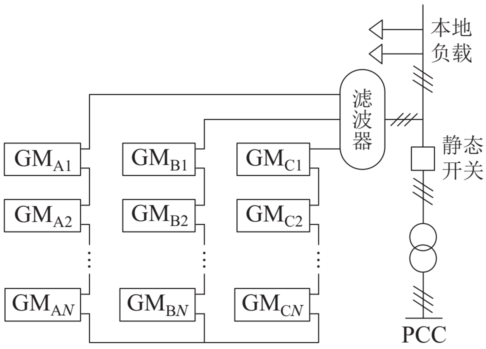
2.1 HCSY-MG并网系统拓扑结构

HCSY-MG系统以分布式可再生能源发电模块(generation sub-module, GM)为基本模块, 采用串联结构星型连接方式组成三相逆变环节, 并经过滤波器连接至交流母线和本地负载. HCSY-MG系统作为一种新型的微电网系统, 能够在灵活为本地负载提供电能的同时, 将多余电能输送至大电网. HCSY-MG系统结构、GM的拓扑结构如图1所示.

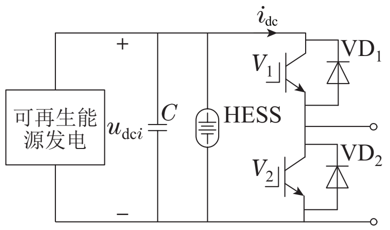
由图1(b)可以看出每个GM包括可再生能源发电模块、稳压电容C、混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)和由功率开关器件$\mathrm{V}_1, \mathrm{V}_2$组成的半桥变流器.

可再生能源发电模块一般由光伏发电和风力发电组成, 其出力会不可避免地具有随机性, 造成HCSY-MG系统输出电压的波动, 从而在并网电流中也存在相应的波动量. 在微电网中, 目前广泛采用配置储能环节的手段, 解决由于可再生能源随机性和波动性造成的系统输出电压波动. 尽管GM直流侧电压的波动可以由分布式HESS平抑, 但仍存在着小幅度的波动, 影响HCSY-MG系统并网电流的质量. 所以, 为进一步降低可再生能源随机性和波动性对HCSY-MG系统并网电流的影响, 需要在并网电流的控制中对其波动量进行自适应补偿.

将每个GM等效为受控电压源, 可得HCSY-MG并网系统的等效电路如图2所示. 图中: $u_{x\mathrm{O}}$为三相逆变环节输出电压; 滤波器为LCL型; R_{e}为线路等效电阻; i_x为系统输出电流; $u_{xN'}$为本地负载电压; $i_{\mathrm{L}x}$为负载电流; $i_{\mathrm{e}x}$为并网电流; e_x为电网电压. 其中x= A, B, C.



(a) HCSY-MG系统结构



(b) GM结构

图 1 HCSY-MG系统拓扑结构

Fig. 1 HCSY-MG system topology

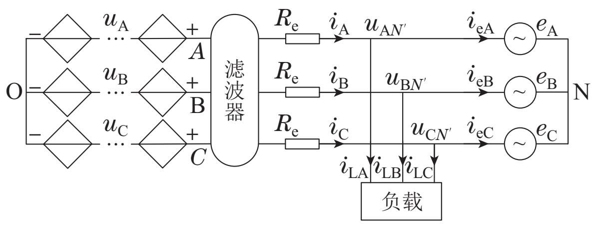


图 2 HCSY-MG并网系统的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of HCSY-MG grid-connected system

2.2 并网电流数学模型及其特性分析

基于图2的并网系统等效电路, 文献[23]给出了在载波移相正弦脉宽调制策略(carrier phase shift-sine pulse width modulation, CPS-SPWM)下半桥变流器输出电压的表达式. 在忽略高次谐波后, HCSY-MG系统单相输出电压u_{AO}可表示为

$$u_{\mathrm{AO}}=\sum_{i=1}^{N}u_{\mathrm{A}}(i)=\frac{u_{\mathrm{dcA}}}{2}+\frac{M\cdot u_{\mathrm{dcA}}}{2}\sin\left(\omega_0 t+\varphi_{\mathrm{A}}\right),\tag{1}$$

式中: $u_{\mathrm{dc}x}=\sum\limits_{i=1}^{N}u_{\mathrm{dc}x}\left(i\right)$为逆变侧$x$相的直流侧电压之和, M为调制比, ω_0为调制波角频率.

由上式可以看出, 当可再生能源波动造成各相直流侧电压之和不相等时, 系统输出电压和并网电流中将包含有直流和基频波动, 进而降低跟踪给定值的精度, 同时影响控制系统的稳定性.

为便于分析HCSY-MG并网电流的特性, 将图2所示的并网系统等效电路转换为等效单相电路, 如图3所示.

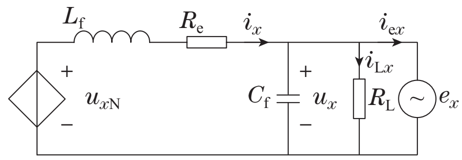


图 3 HCSY-MG并网系统等效单相电路

Fig. 3 Single-phase equivalent circuit of HCSY-MG grid-connected system

由图3可得等效单相并网系统的基尔霍夫电压定律(Kirchhoff voltage law, KVL)方程为

$$u_{x\mathrm{N}}=L_{\mathrm{f}}\frac{\mathrm{d}i_x}{\mathrm{d}t}+R_{\mathrm{e}}i_x+e_x.\tag{2}$$

令$u_{x\mathrm{N}}-e_x=\Delta u_x, i_{\mathrm{e}x}=i_x-i_{\mathrm{L}x}$可得到三相并网电流的矩阵表达式为

$$L_{\mathrm{f}}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_{\mathrm{eA}}\\ i_{\mathrm{eB}}\\ i_{\mathrm{eC}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}R_{\mathrm{e}}&0&0\\0&R_{\mathrm{e}}&0\\0&0&R_{\mathrm{e}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{\mathrm{eA}}\\ i_{\mathrm{eB}}\\ i_{\mathrm{eC}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Delta u_{\mathrm{A}}\\ \Delta u_{\mathrm{B}}\\ \Delta u_{\mathrm{C}}\end{bmatrix}.\tag{3}$$

由式(3)可以看出, 影响并网电流的决定性因素为微电网输出电压与电网电压之差, 即Δu_x. 但又因为电网电压e_x恒定, 所以影响HCSY-MG系统并网电流的关键变量之一为微电网输出电压$u_{x\mathrm{N}}$.

设系统状态为$u_{\mathrm{dcA}}\neq u_{\mathrm{dcB}}\neq u_{\mathrm{dcC}}, \varphi_{\mathrm{A}}=0, \varphi_{\mathrm{B}}=-2\pi/3, \varphi_{\mathrm{C}}=2\pi/3$. 此时, 在CPS-SPWM调制策略下, 忽略高次谐波, 仅考虑直流与基频分量, 可以得到微电网输出电压的表达式为

$$\begin{aligned}u_{\mathrm{AN}}=&\frac{2u_{\mathrm{AO}}-u_{\mathrm{BO}}-u_{\mathrm{CO}}}{3}=\\&\frac{1}{3}[\frac{2u_{\mathrm{dcA}}-u_{\mathrm{dcB}}-u_{\mathrm{dcC}}}{2}+\\&M(u_{\mathrm{dcA}}+\frac{1}{4}u_{\mathrm{dcB}}+\frac{1}{4}u_{\mathrm{dcC}})\sin(\omega_0 t)+\\&\frac{\sqrt{3}}{4}M\left(u_{\mathrm{dcB}}-u_{\mathrm{dcC}}\right)\cos(\omega_0 t)],\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}u_{\mathrm{BN}}=&\frac{2u_{\mathrm{BO}}-u_{\mathrm{AO}}-u_{\mathrm{CO}}}{3}=\\&\frac{1}{3}[\frac{2u_{\mathrm{dcB}}-u_{\mathrm{dcA}}-u_{\mathrm{dcC}}}{2}+\\&M(-\frac{1}{2}u_{\mathrm{dcA}}-\frac{1}{2}u_{\mathrm{dcB}}+\frac{1}{4}u_{\mathrm{dcC}})\sin(\omega_0 t)-\\&\frac{\sqrt{3}}{4}M(2u_{\mathrm{dcB}}+u_{\mathrm{dcC}})\cos(\omega_0 t)],\end{aligned}\tag{5}$$

$$\begin{aligned}u_{\mathrm{CN}}=&\frac{2u_{\mathrm{CO}}-u_{\mathrm{AO}}-u_{\mathrm{BO}}}{3}=\\&\frac{1}{3}[\frac{2u_{\mathrm{dcC}}-u_{\mathrm{dcA}}-u_{\mathrm{dcB}}}{2}+\\&M(-\frac{1}{2}u_{\mathrm{dcA}}+\frac{1}{4}u_{\mathrm{dcB}}-\frac{1}{2}u_{\mathrm{dcC}})\sin(\omega_0 t)+\\&\frac{\sqrt{3}}{4}M(u_{\mathrm{dcB}}+2u_{\mathrm{dcC}})\cos(\omega_0 t)].\end{aligned}\tag{6}$$

由式(4)–(6)可以看出, 在可再生能源波动造成三相直流侧电压不相等时, HCSY-MG系统输出电压中会包含有直流波动量u_{z}和基频波动量u_{s}. 根据式(3), 在并网电流中同样会出现直流波动量i_{z}和基频波动量i_{s}. 因为并网电流常在dq坐标系下进行控制, 所以需要得到并网电流在dq坐标系下的表达式, 在有针对性地对波动量进行补偿的同时, 实现dq轴分量的解耦.

将式(4)–(6)转换至dq坐标系, 可以得到

$$u_{\mathrm{zd}}=\frac{1}{6}\begin{bmatrix}2u_{\mathrm{dcA}}-u_{\mathrm{dcB}}-u_{\mathrm{dcC}}\\ -\sqrt{3}u_{\mathrm{dcB}}+\sqrt{3}u_{\mathrm{dcC}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\sin(\omega_0 t)\\ \cos(\omega_0 t)\end{bmatrix}, \tag{7}$$

$$u_{\mathrm{zq}}=\frac{1}{6}\begin{bmatrix}\sqrt{3}u_{\mathrm{dcB}}-\sqrt{3}u_{\mathrm{dcC}}\\ 2u_{\mathrm{dcA}}-u_{\mathrm{dcB}}-u_{\mathrm{dcC}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\sin(\omega_0 t)\\ \cos(\omega_0 t)\end{bmatrix}, \tag{8}$$

$$u_{\mathrm{sd}}=\frac{2M}{3}\begin{bmatrix}\frac{1}{12}u_{\mathrm{dcA}}+\frac{5}{24}u_{\mathrm{dcB}}+\frac{5}{24}u_{\mathrm{dcC}}\\ \frac{\sqrt{3}}{8}u_{\mathrm{dcB}}-\frac{\sqrt{3}}{8}u_{\mathrm{dcC}}\\ -\frac{1}{4}u_{\mathrm{dcA}}+\frac{1}{8}u_{\mathrm{dcB}}+\frac{1}{8}u_{\mathrm{dcC}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}1\\ \sin(2\omega_0 t)\\ \cos(2\omega_0 t)\end{bmatrix}, \tag{9}$$

$$u_{\mathrm{sq}}=\frac{2M}{3}\begin{bmatrix}\frac{1}{4}u_{\mathrm{dcA}}-\frac{1}{8}u_{\mathrm{dcB}}-\frac{1}{8}u_{\mathrm{dcC}}\\ \frac{\sqrt{3}}{8}u_{\mathrm{dcB}}-\frac{\sqrt{3}}{8}u_{\mathrm{dcC}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\sin(2\omega_0 t)\\ \cos(2\omega_0 t)\end{bmatrix}, \tag{10}$$

式中$u_{\mathrm{zd}}, u_{\mathrm{zq}}, u_{\mathrm{sd}}$和$u_{\mathrm{sq}}$分别为系统输出电压中包含的直流和基频波动量在$dq$坐标系下的表达形式.

由式(7)–(10)可以看出, 在可再生能源波动造成三相直流侧电压不相等时, HCSY-MG系统输出电压中的直流和基频波动量在dq坐标系下会表现为50 Hz和100 Hz的波动量. 同理, 并网电流中也存在相同频率的波动量, 可以表示为

$$i_{\mathrm{zd}}=i_1\sin(\omega_0 t)+i_2\cos(\omega_0 t), \tag{11}$$

$$i_{\mathrm{zq}}=i_3\sin(\omega_0 t)+i_4\cos(\omega_0 t), \tag{12}$$

$$i_{\mathrm{sd}}=i_5+i_6\sin(2\omega_0 t)+i_7\cos(2\omega_0 t), \tag{13}$$

$$i_{\mathrm{sq}}=i_8\sin(2\omega_0 t)+i_9\cos(2\omega_0 t), \tag{14}$$

式中: $i_{\mathrm{zd}}, i_{\mathrm{zq}}, i_{\mathrm{sd}}$和$i_{\mathrm{sq}}$分别为并网电流中包含的直流和基频波动量在$dq$坐标系下的表达形式; $i_1\sim i_9$为相应频率波动量的系数.

由以上HCSY-MG系统并网电流的数学模型可以分析总结出其特性为:

1) 影响HCSY-MG系统并网电流的关键变量为各相GM直流侧电压之和;

2) 当可再生能源出力存在波动时, 会使得各相GM直流侧电压之和同样出现波动, 进而会造成并网电流中包含有直流分量和基频偏差量;

3) 系统输出电压和并网电流中包含的直流分量和基频偏差量在dq坐标系下表现为50 Hz和100 Hz的波动量.

3 波动量自适应补偿的并网电流模型预测控制

由图1所示的HCSY-MG系统拓扑结构可以看出, 因为该系统的各相GM直流侧不存在公共直流链, 所以, 可再生能源出力波动对直流侧电压之和的影响会更为严重. 在对HCSY-MG系统并网电流进行控制时, 必须要考虑到上述特性. MPC由于包含着滚动优化和预测模型, 适用于存在大量可再生能源的HCSY-MG系统, 故本节将研究一种波动量自适应补偿的并网电流MPC策略. 同时, 为提高滚动优化环节的收敛速度和降低算法陷入局部最优的概率, 对滚动优化环节使用的AO算法进行改进.

3.1 HCSY-MG系统并网电流预测模型

MPC策略中广泛采用的预测模型包括有微分方程、差分方程、状态方程和传递函数等[23], 本节结合第2.2节建立的并网电流数学模型, 给出HCSY-MG系统并网电流MPC策略中采用的预测模型. 根据得到的dq坐标系下的控制变量E_{d}, E_{q}, 经过2/3变换后得到abc坐标系下的三相调制波E_{A}, E_{B}, E_{C}, 再通过式(1)(4)–(6), 可得到HCSY-MG系统输出电压, 最后经式(3)得到三相并网电流预测值. 并网电流预测模型的示意图如图4所示.

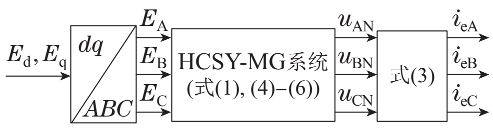


图 4 HCSY-MG系统并网电流预测模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grid-connected current prediction model for HCSY-MG system

3.2 反馈校正及优化问题

在含有大量可再生能源的HCSY-MG系统中, 由于可再生能源的随机性和波动性, 并网电流预测模型无法准确刻画未来结果. 所以, 需要加入反馈校正环节以降低可再生能源波动性对MPC的影响, 即通过修正预测模型的输出, 提高预测模型的精度. 本文所使用的反馈校正可以表示为

$$i'_{\mathrm{d}}=0.5i_{\mathrm{d}}+0.5\hat{i}_{\mathrm{d}}, \tag{15}$$

$$i'_{\mathrm{q}}=0.5i_{\mathrm{q}}+0.5\hat{i}_{\mathrm{q}}, \tag{16}$$

式中: $i'_{\mathrm{d}}, i'_{\mathrm{q}}$分别为并网电流经反馈校正后的值; $i_{\mathrm{d}}, i_{\mathrm{q}}$分别为并网电流经3/2变换后的实际值; $\hat{i}_{\mathrm{d}}, \hat{i}_{\mathrm{q}}$分别为预测模型输出并网电流经3/2变换后的预测值.

为达到准确跟踪并网电流给定值的目的, 取二次型最优化函数作为滚动优化环节的目标函数, 即

$$\begin{aligned}\min J(k) = &\left[\Delta i_{\mathrm{d}}(k+i|k)\right]^{\mathrm{T}} P\left[\Delta i_{\mathrm{d}}(k+i|k)\right] + \\ &\left[\Delta i_{\mathrm{q}}(k+i|k)\right]^{\mathrm{T}} Q\left[\Delta i_{\mathrm{q}}(k+i|k)\right],\end{aligned} \tag{17}$$

式中: k为当前时刻, i为预测步长, $P=\mathrm{diag}\{0.5,0.5,\cdots,0.5\}$, $Q=\mathrm{diag}\{0.5,0.5,\cdots,0.5\}$为加权对角矩阵, Δi_{d}和Δi_{q}的表达式为

$$\begin{cases}\Delta i_{\mathrm{d}} = i_{\mathrm{dref}} - i'_{\mathrm{d}},\\ \Delta i_{\mathrm{q}} = i_{\mathrm{qref}} - i'_{\mathrm{q}},\end{cases} \tag{18}$$

式中i_{dref}, i_{qref}分别为并网电流dq轴分量的目标值.

同时, 为保证并网电流控制的精度, 减轻可再生能源出力波动对HCSY-MG系统并网电流的影响, 需要补偿如式(11)–(14)所示的50 Hz和100 Hz的波动量. 并且, 为提升q轴电流对于给定值的静态跟踪效果, 将式(14)重写为

$$i'_{\mathrm{sq}} = i_8 + i_9\sin(2\omega_0 t) + i_{10}\cos(2\omega_0 t), \tag{19}$$

进而, 可得到带有补偿量的控制变量为

$$\begin{cases}E_{\mathrm{d}} = i_{\mathrm{zd}} + i_{\mathrm{sd}},\\ E_{\mathrm{q}} = i_{\mathrm{zq}} + i'_{\mathrm{sq}},\end{cases} \tag{20}$$

从式(20)可以看出, 滚动优化环节需要输出的最优补偿系数共10个, 分别对应为式(11)–(13)(19)中各频率波动量的系数. 为避免混淆, 设滚动优化环节输出的最优补偿系数为$x_1 \sim x_{10}$. 此外, 根据式(20)给出的控制变量可以看出, 此时并网电流在dq坐标系下的分量实现了完全解耦, 即二者之间不存在任何耦合关系, 可以显著提高控制系统的效果.

由3/2变换和2/3变换的理论可知, 三相正弦量在经过3/2变换后, d轴分量等于三相正弦量的幅值. 为保证HCSY-MG系统运行的安全, 并网电流不能超过各元件的最大承受限度. 所以, 将输出约束转换为状态约束, 即设置MPC策略中滚动优化环节输出补偿量$x_1 \sim x_{10}$的范围为$[-80, 80]$.

3.3 基于改进AO算法的滚动优化

滚动优化环节作为MPC策略中的一个重要组成部分, 其快速性和寻优效果成为制约MPC发展的瓶颈. 因为AO算法更快的收敛速度和更优的寻优结果, 所以本文将采用AO算法作为MPC中滚动优化环节的核心算法.

AO算法中共包括了4个阶段, 分别为初始化阶段、综合淘汰阶段、局部清除阶段和后巩固阶段. 其中, 初始化阶段的搜索代理可以表示为

$$A_{N,D} = B + R(T-B) = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1D}\\ \vdots & & \vdots\\ a_{N1} & \cdots & a_{ND}\end{bmatrix}, \tag{21}$$

式中: A为初始化的种群, N为种群数量, D为搜索代理的维度, T和B分别为搜索空间的上下界, $R\in[0,1]$为随机数序列.

综合淘汰阶段的搜索代理更新过程为

$$a_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} a_{i,j}^t + (-1)^t c\cdot a_{i,j}^t, & \mathrm{rand} < 0.5,\\ a_{i,j}^t + (-1)^t c\cdot \mathrm{best}_j^t, & \mathrm{rand} > 0.5,\end{cases} \quad r_1 < K, \tag{22}$$

式中: $a_{i,j}^t$和$a_{i,j}^{t+1}$分别为更新前后的搜索代理; best_j^t为当前最优; c为药物在人体内的浓度衰减系数; $r_1\in[0,1]$为一随机数; K为一概率系数, 表示该阶段持续时间的差异.

局部清除阶段的搜索代理更新过程可以表示为

$$a_i^{t+1} = a_{b3}^t + d(a_{b1}^t - a_{b2}^t),\ \mathrm{rand} < f_{\mathrm{norm}}(i), \tag{23}$$

式中: $f_{\mathrm{norm}}(i)$为归一化的适应度值; $d\in$[0.1, 0.6]为一随机值; $b1, b2, b3$满足如下条件:

$$b1, b2, b3 \sim U(1, N),\ b1 \neq b2 \neq b3. \tag{24}$$

后巩固阶段的搜索代理更新过程可以表示为

$$a_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} a_{i,j}^t, & \mathrm{rand} < 0.05,\\ \mathrm{best}_{i,j}, & \mathrm{rand} < 0.2.\end{cases} \tag{25}$$

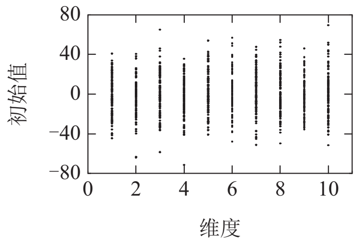
通过对AO算法基本原理的叙述可以发现, 在初始化阶段中, 搜索代理是通过随机参数R实现初始化. 文献[24]指出该随机初始策略会导致种群多样性较弱, 且搜索代理在迭代过程中易陷入局部最优, 所以利用Tent映射对麻雀搜索优化算法的种群进行混沌化, 并提出一种有效的混沌麻雀搜索优化算法. 关于Tent混沌映射的有效性, 文献[25]通过严格的数学推理, 证明了Tent映射能够有效混沌化优化算法中的种群, 并且相比于Logistic映射, 有着更优的遍历性和收敛速度. 所以, 本文将采用Tent映射混沌化AO算法的初始种群, 以提升初始化种群的多样性和随机性, 降低搜索代理陷入局部最优的风险. Tent映射的数学表达式为

$$a^{k+1} = \begin{cases} \dfrac{a^k}{\beta}, & a^k \in (0, \beta],\\ \dfrac{1-a^k}{1-\beta}, & a^k \in (\beta, 1],\end{cases} \tag{26}$$

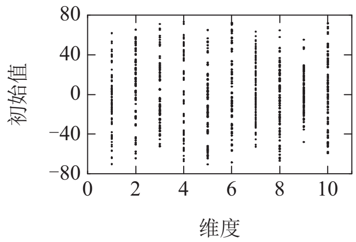
式中β为混沌因子.

混沌化前后的初始化种群示意图如图5所示. 由图5可以看出, 混沌化前的初始化种群分布大多集中

随机分布在$[-40, 40]$区间内, 在$[-80, -40]$和$[40, 80]$区间内存在的搜索代理数量较少; 但混沌化后的初始化种群能够更均匀地分布在$[-80, 80]$区间内. 以上结果证明了所采用的Tent混沌映射可以有效提升初始化种群在待搜索空间内的随机性和遍历性.



(a) 混沌化前



(b) 混沌化后

图 5 混沌化前后的初始化种群

Fig. 5 Initialized populations before and after chaoticization

同时, 统计分析了AO算法除初始化阶段之外的3个核心阶段, 各阶段在优化迭代过程中的平均占比分别为: 综合淘汰阶段占15%, 局部清除阶段占57%, 后巩固阶段占28%. 由此可见, 局部清除阶段占据了大多数迭代过程, 说明在该阶段可能会陷入局部最优, 并且收敛缓慢. 所以, 本小节将使用自适应更新策略改进式(23)中参数d的选择.

在改进策略中, 通过比较搜索代理在当前迭代中适应度值与前一次迭代中平均适应度值的大小, 以确定参数d的自适应更新方式. 该策略可以表示为

$$d=\begin{cases} d_{\max}, \text{其他}, \\ d_{\min}+\dfrac{(f(i)-f_{\min})(d_{\max}-d_{\min})}{f_{\text{ave}}-f_{\min}}, \\ \quad f(i)<f_{\text{ave}}, \end{cases} \tag{27}$$

式中: $d_{\min}$与$d_{\max}$分别为参数d的最小值与最大值, 即0.1与0.6; $f(i)$为当前适应度值; $f_{\min}$为适应度值的最小值; f_{ave}为适应度值的平均值.

若搜索代理的更新方式按式(23)进行, 搜索代理的更新步长为d, 但d为一随机数, 所以更新步长不受控制, 导致搜索代理不能更快收敛至最优解. 若搜索代理更新方式中的参数d按式(27)所示的自适应更新方式时, 参数d的更新步长将受到$f(i)$, 即当前适应度值的影响; 当$f(i)<f_{\text{ave}}$时, 说明此时的搜索代理能达到较小的适应度值, 即有着更优的寻优结果, 此时应加速收敛, 并且在加速收敛的同时突破可能存在的局部最优. 当$f(i)>f_{\text{ave}}$时, 说明此时的搜索代理不能收敛到一个较优的结果, 此时不能取过小的d, 以保证搜索代理的探索性, 防止无法收敛至最优值.

随后, 结合第3.2小节给出的滚动优化环节输出的最优补偿系数$x_1\sim x_{10}$, 设改进AO算法中的搜索代理维度$\text{dim}=10$. 最后, 根据第3.1小节所给出的并网电流预测模型、第3.2小节给出的反馈校正及优化问题、第3.3小节提出的基于改进AO的滚动优化环节, 可以得到如图6所示的HCSY-MG系统并网电流MPC策略框图.

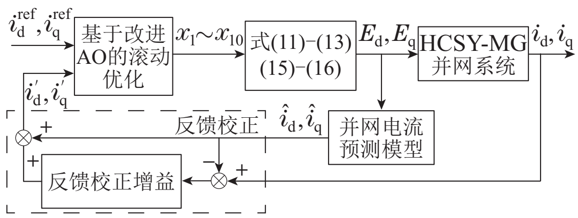


图 6 HCSY-MG系统并网电流MPC策略框图

Fig. 6 Block diagram of grid-connected current MPC strategy for HCSY-MG system

由图6所示的HCSY-MG系统并网电流MPC策略可以看出, 所提出的策略是根据HCSY-MG并网电流特性提出的, 即如式(20)所示的最优控制序列. 同时, 可以实现dq轴分量的完全解耦, 提高并网电流的控制效果与精度. 下文将通过仿真和实验对比, 证明本节所提出MPC策略的有效性、可行性和优越性.

4 仿真验证

为验证本文所提基于波动量自适应补偿的HCSY-MG系统并网电流模型预测控制在可再生能源波动条件下的可行性和有效性, 搭建了相应的仿真模型, 并与重复控制和PI控制构成的复合控制进行对比验证. 仿真中的主要参数如表1所示.

4.1 直流侧电压之和不相等

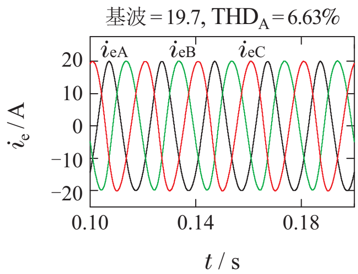
由于HCSY-MG系统各GM通过串联方式连接, 所以其输出电流是相等的, 当可再生能源波动造成其出力波动时, 会造成其输出电压出现波动, 进而造成各相GM直流侧电压之和出现波动. 设置$u_{\text{dcA}}=600$ V, $u_{\text{dcB}}=u_{\text{dcC}}=640$ V, 用以模拟由于可再生能源随机波动造成的各相直流侧电压之和不相等的工况, 同时观察本文所提MPC策略的静态特性. 并网电流给定值$i_{\text{dref}}=20$ A, $i_{\text{qref}}=0$ A, 电网线电压$e=380$ V.

在该种工况时, 采用复合控制策略的HCSY-MG系统三相并网电流波形和i_d, i_q的波形如图7所示. 由图7(a)可以看出, 当可再生能源波动造成各相直流侧电压之和不相等时, 采取复合控制可以使HCSY-MG系统并网电流的幅值较好地跟踪给定值, 但三相并网电流的正弦度存在差异. 此时i_A的基波分量为19.7 A, 跟随给定值的效果较好. 但总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)达到了6.63%, 大于IEEE所要求的5%. 此时其余两相并网电流的THD分别为6.45%, 6.42%; 三相并网电流中所包含的直流分量分别为1.33 A, 0.93 A, 0.41 A. 由该结果可以看出, 此时三相并网电流的THD均较高, 且含有一定的直流分量. 观察图7(b)中的i_d和i_q曲线, 其中i_d曲线可以较为快速地跟随给定并保持; 但i_q曲线需要较长的时间才可达到给定值, 同时存在着波动. 该现象说明, 在复合控制策略下, HCSY-MG系统并网电流的幅值可以较好地跟随给定值, 但其与电网电压的相位差存在着波动.

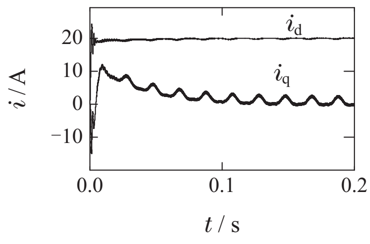
表 1 仿真中的主要参数

Table 1 The main parameters in the simulation

	参数	数值
HCSY-MG系统参数	变流器侧滤波电感	1 mH
	网侧滤波电感	0.1 mH
	滤波电容	20 μF
	线路等效电阻	1 Ω
	载波频率	10 kHz
AO算法主要参数	种群数量	30
	迭代次数	50
	上下限约束	[−80, 80]
	混沌因子	0.7
	搜索代理维度	10
复合控制主要参数	重复控制增益	3.5
	超前环节步数	6
	二阶滤波器截止频率	1 kHz
	比例环节增益	10
	积分环节增益	500



(a) 三相并网电流波形

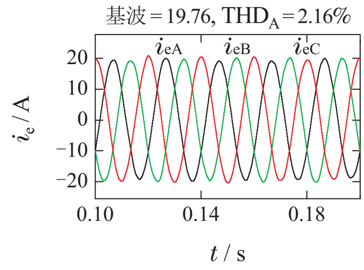


(b) i_d, i_q波形

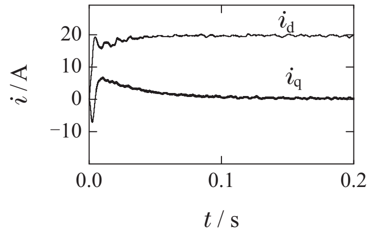
图 7 工况1条件下采用复合控制策略的并网电流特征

Fig. 7 Characteristics of the grid-connected current under operating condition 1 using the composite control strategy

在同样的工况下, 采用本文所提出的HCSY-MG系统并网电流MPC策略时, 三相并网电流波形和i_d, i_q波形如图8所示.



(a) 三相并网电流波形



(b) i_d, i_q波形

图 8 工况1条件下采用MPC策略的并网电流特征

Fig. 8 Characteristics of the grid-connected current under operating condition 1 using the MPC strategy

由图8(a)可以看出, 在可再生能源波动造成各相直流侧电压之和不相等的情况下, 采用本文所提MPC策略时的并网电流幅值可以较好地跟踪给定值, 但三相并网电流的正弦度明显优于复合控制下的情况. 此时i_A的基波分量为19.76 A, 跟随给定值的效果较好, 同时, THD仅为2.16%, 满足IEEE所要求的并网电流THD应小于5%. 此时其余两相并网电流的THD分别为2.19%, 1.93%; 三相并网电流中所包含的直流分量分别为0.04 A, 0.09 A, 0.04 A. 由该结果可以看出, 本文所提出的MPC策略可以保证三相并网电流的THD均小于IEEE要求的5%, 同时所包含的直流分量则均有明显下降. 该仿真结果说明, 当由可再生能源波动造成各相直流侧电压之和不相等时, 本文所提出的并网电流控制策略在保证并网电流质量和降低直流分量方面是有效且可行的. 图8(b)的曲线可以反映出i_d和i_q曲线都可以较为快速地跟随给定值并保持. 但i_q曲线需要较长的时间才可得到给定值并保持. 相比于图7(b)中的i_d和i_q曲线, 采用本文提出HCSY-MG系统并网电流MPC策略时的i_q曲线不存在周期性波动, 保证了并网电流与电网电压之间的相位差不会存在波动.

在此过程中, AO算法的适应度函数收敛曲线和搜索代理更新过程如图9所示. 由图9给出的AO算法改进前后的适应度值收敛过程可以看出, 改进前的适应度值收敛缓慢, 且存在斜率为零的部分, 即陷入局部最优; 改进后的适应度值收敛迅速, 可以更快地收敛

至最小值. 改进后的各阶段占总迭代次数的比例分别为: 综合淘汰阶段占24%, 局部清除阶段占34%, 后巩固阶段占42%. 以上结果证明了本文对AO算法进行的改进是可行且有效的, 即Tent混沌映射和参数自适应更新策略能够进一步加速该算法的收敛, 并且降低陷入局部最优的风险. 同时, 改进AO算法在迭代50次后, 适应度值可以收敛至0.24, 并且在20 次迭代时已经收敛至接近最小值, 也证明了改进策略的有效性. 最终在该工况下, 改进AO算法得到的$x_1 \sim x_{10}$最优值分别为: 13.29, −0.04, −0.02, 13.33, 5.93, −0.18, −5.95, −0.2, 5.98, −0.01.

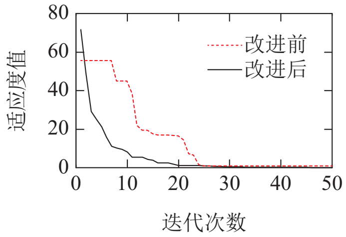


图 9 AO算法迭代过程

Fig. 9 Iterative process of AO algorithm

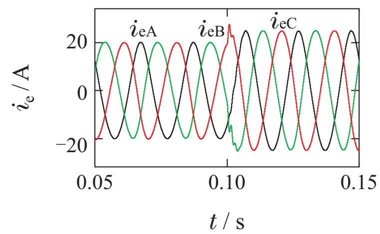
结合以上仿真结果与分析可以得到, 本文利用Tent混沌映射和参数自适应更新策略能够有效加速AO算法的收敛, 并且能够降低算法陷入局部最优的风险; 在可再生能源波动造成各相直流侧电压之和不相等时, 相较于重复控制和PI控制组成的复合控制策略, 本文所提出的波动量自适应补偿MPC策略能够使并网电流在准确跟踪给定值的基础上, 更好地保持并网电流的高质量, 同时具有更优的静态特性.

4.2 并网电流给定值变化

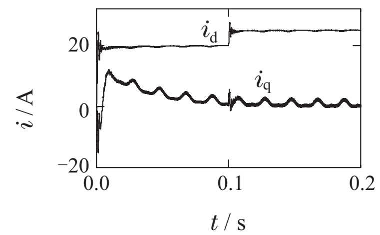
依旧设置系统状态为$u_{\mathrm{dcA}} = 600$ V, $u_{\mathrm{dcB}} = u_{\mathrm{dcC}} = 640$ V, 电网线电压$e = 380$ V. 并网电流给定值在0.1 s之前为$i_{\mathrm{dref}} = 20$ A, $i_{\mathrm{qref}} = 0$ A, 0.1 s时变为$i_{\mathrm{dref}} = 25$ A. 用以模拟在可再生能源波动造成各相直流侧电压之和不相等时, 并网电流给定值变化的工况, 同时观察本文所提MPC策略的动态特性.

此时采用复合控制策略的HCSY-MG系统三相并网电流波形和i_{d}, i_{q}的波形如图10所示. 由图10(a)的三相并网电流波形可以看出, 在并网电流给定值变化的瞬间, 并网电流会出现较为剧烈的抖动, 但在短暂调整后, 其幅值可以跟随给定值. 由图10(b)可以看出, i_{d}和i_{q}在给定值变化时会出现较为剧烈的抖动, 但i_{d}会在短暂调整后准确跟随给定值, i_{q}依旧存在着周期性波动. 同时可以发现, 当i_{d}的给定值变化时, i_{q}也会出现抖动, 即dq轴分量存在着耦合.

在同样的工况下, 采用本文所提出的HCSY-MG系统并网电流MPC策略时, 三相并网电流波形和i_{d}, i_{q}的波形如图11所示. 对比图11与图10, 当并网电流给定值在0.1 s变化时, 采用本文所提控制策略的并网电流不存在剧烈抖动, 其幅值也可以很快地跟随给定值的变化, 同时i_{dref}的变化仅会使i_{d}跟随变化, 不会对i_{q}造成任何影响, 证明了本文所提控制策略可以实现dq轴分量的完全解耦, 并且i_{q}不存在周期性波动.



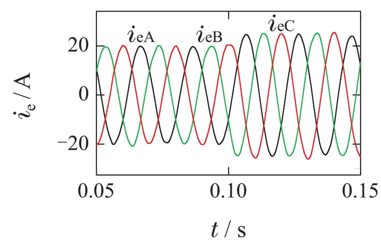
(a) 三相并网电流波形



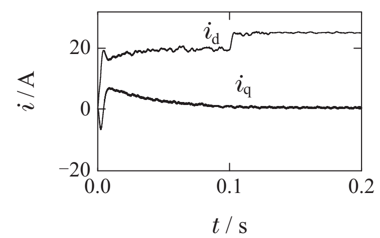
(b) i_{d}, i_{q}波形

图 10 工况2条件下采用复合控制策略的并网电流特征

Fig. 10 Characteristics of the grid-connected current under operating condition 2 using the composite control strategy



(a) 三相并网电流波形



(b) i_{d}, i_{q}波形

图 11 工况2条件下采用MPC策略的并网电流特征

Fig. 11 Characteristics of the grid-connected current under operating condition 2 using the MPC strategy

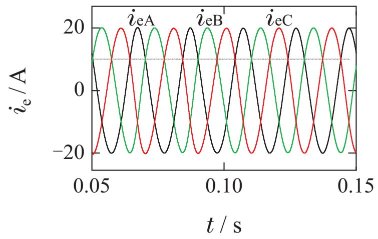
结合以上仿真结果与分析可以得到, 并网电流给定值变化时, 采用本文所提MPC策略的HCSY-MG系统并网电流能够迅速跟随给定值, 并且实现了dq轴分量的完全解耦, 同时有着更优的动态特性.

4.3 直流侧电压之和变化

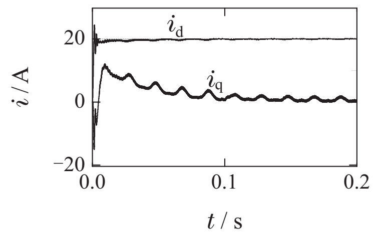
设置系统状态为$u_{\mathrm{dcA}} = 600$ V, $u_{\mathrm{dcB}} = u_{\mathrm{dcC}} =$

640 V, 电网线电压$e=380$ V, 并网电流给定值为$i_{\rm dref}=$ 20 A, $i_{\rm qref}=0$ A. 0.1 s时$u_{\rm dcA}$由600 V变为620 V, $u_{\rm dcB}$由640 V变为620 V, 用以模拟可再生能源波动造成HCSY-MG系统各相直流侧电压之和波动的工况, 同时观察本文所提MPC策略的动态特性.

此时采用复合控制策略的HCSY-MG系统三相并网电流波形和$i_{\rm d}$, $i_{\rm q}$的波形如图12所示. 由图12(a)的HCSY-MG系统三相并网电流波形可以看出, 在采用复合控制时, 系统直流侧电压之和的波动基本不会对并网电流的特征产生较大影响. 由图12(b)的$i_{\rm d}$和$i_{\rm q}$曲线可以看出, 系统直流侧电压之和的波动对$i_{\rm d}$基本没有影响, 但可明显发现会使$i_{\rm q}$的波动量减小, 即仍会造成并网电流与电网电压之间存在相位波动.



(a) 三相并网电流波形



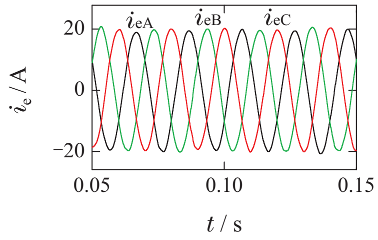
(b) $i_{\rm d}$, $i_{\rm q}$波形

图 12 工况3条件下采用复合控制策略的并网电流特征

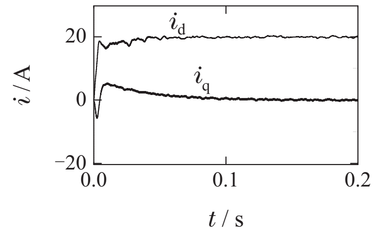
Fig. 12 Characteristics of the grid-connected current under operating condition 3 using the composite control strategy

在同样的工况下, 当采取本文所提出的HCSY-MG系统并网电流MPC策略时, 三相并网电流波形和$i_{\rm d}$, $i_{\rm q}$的波形如图13所示. 由图13(a)可以看出, 各相直流侧电压之和在0.1 s变化时, 采用本文所提控制策略的并网电流基本不存在变化. 同时, 从图13(b)可以看出, $i_{\rm d}$和$i_{\rm q}$依然可以较为准确地跟踪给定值, 并且在直流侧电压之和变化的时刻没有出现较大波动. 对比图13与图12, 本文所提出的并网电流MPC策略在各相直流侧电压之和波动时, 可以使HCSY-MG系统的并网电流保持良好的动态特性.

以上3种工况下的仿真结果证明, 在可再生能源存在波动性的情况下, 相比于重复控制和PI控制构成的复合控制策略, 本文所提出的并网电流MPC策略均能够使并网电流较为准确且稳定地跟踪给定值. 同时, 该策略不仅可以实现dq轴分量的完全解耦, 而且能够提高控制效果, 而且其静态和动态过程更优. 此外, 所采用的Tent混沌映射和参数自适应更新策略不仅可以加速AO算法的收敛, 而且可以降低算法选入局部最优的概率. 以上结果均证明了本文所提方法具有可行性和有效性.



(a) 三相并网电流波形



(b) $i_{\rm d}$, $i_{\rm q}$波形

图 13 工况3条件下采用MPC策略的并网电流特征

Fig. 13 Characteristics of the grid-connected current under operating condition 3 under the MPC strategy

5 实验验证

为验证HCSY-MG拓扑结构以及本文所提并网电流控制策略的可行性和有效性, 搭建了相应的实验平台. HCSY-MG并网实验平台的主要参数为: 每相GM个数$N=4$, GM直流侧电压$u_{\rm dc}=80$ V, 并网点线电压$e=110$ V, 载波频率$f_{\rm c}=10$ kHz, 补偿量范围$[-5, 5]$. 实验平台如图14所示.

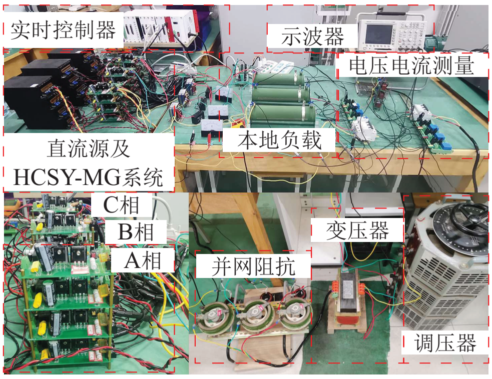
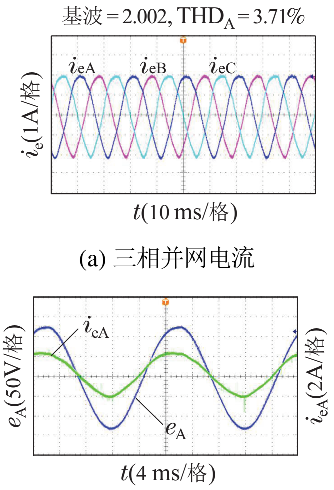


图 14 实验平台照片

Fig. 14 Photo of experimental platform

设置A相直流侧电压之和$u_{\rm dcA}=310$ V, 其余两相$u_{\rm dcB}=u_{\rm dcC}=320$ V, 用以模拟可再生能源波动造成各相直流侧电压之和不相等的工况.

此时采用复合控制策略的HCSY-MG系统三相并网电流实验波形, 以及A相并网电流与电网电压波形如图15所示.



(a) 三相并网电流

(b) i_{eA}与e_A

图 15 复合控制策略下的并网电流实验特征

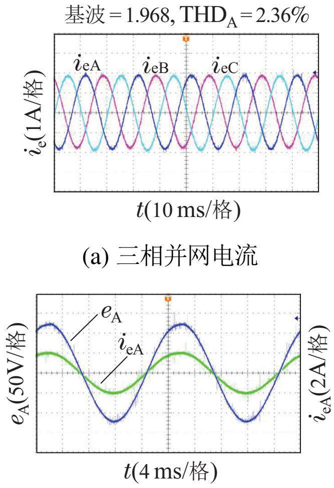
Fig. 15 Experimental characteristics of the grid-connected current under the composite control strategy

由图15(a)的HCSY-MG系统并网电流实验波形可以看出, 并网电流的幅值可以较为准确地跟踪给定值且保持稳定. 此时的基频分量为2.002 A, THD=3.71%, 其中对电流给定值的跟踪误差为0.002 A. 尽管基波分量可以较好地达到给定值, 但其THD较大, 所以复合控制策略在对HCSY-MG系统并网电流进行控制时存在着一定缺陷. 观察图15(b)中电网电压与并网电流波形可以看出, 尽管并网电流的相位可以较为准确地与电网电压保持同步, 但二者上升段的过零点存在一定的偏差.

由于实时控制器的运算能力有限, 首先, 在离线条件下得到相应的最优补偿系数$x_1 \sim x_{10}$分别为: 3.31, 0.03, 0.01, 3.32, 1.42, −0.03, −1.48, 0.19, 1.49, 0.01. 随后将上述最优参数带入本文所提并网电流控制策略中, 此时的HCSY-MG系统三相并网电流波形, 以及A相并网电流与电网电压波形如图16所示.

由图16(a)的三相并网电流波形可以看出, 其幅值均可以较为准确地跟踪给定值, 且正弦度良好. 此时的基波分量为1.968 A, THD=2.36%. 相较于复合控制, 尽管电流幅值的跟踪精度略有下降, 但THD明显更优. 观察图16(b)的A相电网电压与并网电流波形可以发现, 并网电流的相位可以准确地与电网电压保持同步. 与图15(b)对比可以看出, 二者上升段的过零点不存在偏差, 故本文提出的并网电流控制策略可以更好地保证并网电流与电网电压的相位一致.

以上实验结果证明, 与重复控制和PI控制构成的复合控制策略相比, 本文所提出的并网电流MPC策略不仅可以使得并网电流更为准确地跟踪给定值, 而且可以实现dq轴分量的完全解耦控制, 同时静态和动态特性更优. 综上, 本文所提出的HCSY-MG系统并网电流波动量自适应补偿MPC策略是可行的、有效的, 同时更具有针对性.



(a) 三相并网电流

(b) i_{eA}与e_A

图 16 MPC策略下的并网电流实验特性

Fig. 16 Experimental characteristics of the grid-connected current under the MPC strategy

6 结论

本文为降低各相直流链电压之和不相等对并网电流稳定性的影响, 以及提高HCSY-MG系统并网电流控制的精度, 有针对性地提出一种并网电流波动量自适应补偿的模型预测控制策略; 同时, 为提升模型预测控制中滚动优化环节的收敛速度和寻优效率, 提出一种改进AO算法, 并通过仿真验证了改进策略的有效性和可行性; 最后, 通过仿真和实验对比分析了本文所提MPC策略与重复控制和PI控制构成的复合控制策略, 证明了本文应用模型预测控制解决HCSY-MG系统并网电流控制问题具有以下优势: 在可再生能源出力波动造成各相直流侧电压之和不相等、直流侧电压之和波动、并网电流给定值变化的情况下, 能有效提高并网电流对于给定值的跟踪精度; 在实现dq轴控制分量完全解耦的同时, 保证更优的静态和动态特性; 更能适应可再生能源的波动和HCSY-MG系统的特殊性.

然而, 本文并未考虑HCSY-MG系统各相直流侧电压之和不相等的极限. 因此, 在保证系统安全稳定运行的前提下, 还需要研究各相直流侧电压之和不相等的极限, 以及越限以后的并网电流控制策略.

参考文献:

[1] PANWAR N L, KAUSHIK S C, KOTHARI S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3): 1513 – 1524.

[2] CARTON J G, OLABI A G. Wind/Hydrogen hybrid systems: Opportunity for ireland's wind resource to provide consistent sustainable energy supply. *Energy*, 2010, 35(12): 4536 – 4544.

[3] FENG Wei, SUN Kai, GUAN Yajuan, et al. A harmonic current suppression strategy for voltage source grid-connected inverters based on

output voltage hybrid control in islanded microgrids. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(7): 72 – 80.
(冯伟, 孙凯, 关雅娟, 等. 孤立微电网中基于输出电压复合控制的电压源型并网逆变器谐波电流抑制策略. 电工技术学报, 2016, 31(7): 72 – 80.)

[4] TU Chunming, YANG Yi, XIAO Fan, et al. The output side power quality control strategy for microgrid main inverter under nonlinear load. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(11): 2486 – 2495.
(涂春鸣, 杨义, 肖凡, 等. 非线性负载下微电网主逆变器输出侧电能质量控制策略. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2486 – 2495.)

[5] WANG X G, LI J J, GUO Q, et al. Parameter design of half-bridge converter series y-connection microgrid grid-connected filter based on improved PSO-LSSVM. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023, DOI: 10.1155/2023/9534004.

[6] WANG Xinggui, LI Yu, LI Jinjian, et al. Power balance control strategy for HCSY-MG based on trapezoidal wave compensation and power adaptation. *Proceeding of the CSEE*, 2024, 2: 1 – 13.
(王兴贵, 李昱, 李锦键, 等. 基于梯形波补偿和功率自适应的HCSY-MG功率平衡控制策略. 中国电机工程学报, 2024, 2: 1 – 13.)

[7] GUAN M Y, XU Z. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(12): 4858 – 4867.

[8] LAN Ziran, HAO Ruixiang, JIAO Honglin, et al. Optimal preview control of three-phase inverter based on repetitive control and state-feedback. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(6): 1473 – 1481.
(兰梓冉, 郝瑞祥, 角宏林, 等. 基于重复控制和状态反馈的三相逆变器最优预见控制. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1473 – 1481.)

[9] WANG Xinggui, WANG Hailiang, XUE Sheng, et al. Grid-connected current control for MMC-MG adopting nonlinear passive theory. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(8): 1541 – 1550.
(王兴贵, 王海亮, 薛晟, 等. 采用非线性无源理论的MMC-MG并网电流控制. 控制理论与应用, 2022, 39(8): 1541 – 1550.)

[10] GUO Leilei, JIN Nan, LI Yanyan, et al. Grid voltage sensorless model predictive control for grid-connected inverters. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(12): 2612 – 2622.
(郭磊磊, 金楠, 李琰琰, 等. 并网逆变器无电网电压传感器模型预测控制. 电工技术学报, 2020, 35(12): 2612 – 2622.)

[11] LU Peng, YE Lin, PEI Ming, et al. Coordinated control strategy for active power of wind power cluster based on model predictive control. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(17): 5887 – 5899.
(路朋, 叶林, 裴铭, 等. 风电集群有功功率模型预测协调控制策略. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5887 – 5899.)

[12] WANG Lianqiang, ZHANG Li, XIONG Yongsheng, et al. Research on three-phase modeling MPC strategy suitable for MMC multi-objective control. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(S1): 287 – 294.
(王连强, 张莉, 熊永圣, 等. 适用于MMC多目标控制的三相建模MPC策略研究. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 287 – 294.)

[13] HUANG Haihong, YAN Bichen, WANG Haixin. Model predictive control of current tracking optimization and circulating current suppression for multi-parallel cascaded h-bridge power supplies. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(16): 4376 – 4390.
(黄海宏, 颜碧琛, 王海欣. 并联级联H桥电源电流跟踪优化与环流抑制的模型预测控制. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4376 – 4390.)

[14] CORTÉS P, WILSON A, KOURO S, et al. Model predictive control of multilevel cascaded h-bridge inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(8): 2691 – 2699.

[15] TUO P, GONG Z, ZHENG X, et al. Three-stage model predictive control for modular multilevel converters with comprehensive performance optimization. *Journal of Power Electronics*, 2024, 4: 1 – 12.

[16] GAO X N, TIAN W, YANG Q F, et al. Model predictive control of a modular multilevel converter considering control input constraints. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(1): 636 – 648.

[17] CUZMAR R H, MORA A, PEREDA J, et al. Long-horizon sequential FCS-MPC approaches for modular multilevel matrix converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(5): 5137 – 5147.

[18] WU Chenghui, LIN Shenghong, XIA Chengjun, et al. Distributed optimal dispatch of microgrid cluster based on model predictive control. *Power System Technology*, 2020, 44(2): 530 – 538.
(吴成辉, 林声宏, 夏成军, 等. 基于模型预测控制的微电网群分布式优化调度. 电网技术, 2020, 44(2): 530 – 538.)

[19] ZHAO Shuqiang, WANG Hui, TIAN Na, et al. Model predictive control based DC microgrid virtual inertia optimal method. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(12): 3264 – 3276.
(赵书强, 王慧, 田娜, 等. 基于模型预测控制的直流微电网虚拟惯量优化方法. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3264 – 3276.)

[20] ZHANG Haikuo, MENG Xiuyun. UAV online path planning of based on improved RRT algorithm. *Systems Engineering & Electronics*, 2024, 6: 1 – 10.
(张海阔, 孟秀云. 基于改进RRT算法的无人机在线航迹规划. 系统工程与电子技术, 2024, 6: 1 – 10.)

[21] YE Lin, LU Peng, ZHAO Yongning, et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6181 – 6197.
(叶林, 路朋, 赵永宁, 等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6181 – 6197.)

[22] YUAN C, ZHAO D, HEIDARI A A, et al. Artemisinin optimization based on malaria therapy: Algorithm and applications to medical image segmentation. *Displays*, 2024, 5: 1 – 64.

[23] LI B, YANG R, XU D, et al. Analysis of the phase-shifted carrier modulation for modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30 (1): 297 – 310.

[24] LÜ Xin, MU Xiaodong, ZHANG Jun, et al. Chaos sparrow search optimization algorithm. *Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 47(8): 1712 – 1720.
(吕鑫, 慕晓冬, 张钧, 等. 混沌麻雀搜索优化算法. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1712 – 1720.)

[25] SHAN Liang, QIANG Hao, LI Jun, et al. Chaotic optimization algorithm based on Tent map. *Control & Decision*, 2005, 20(2): 179 – 182.
(单梁, 强浩, 李军, 等. 基于Tent映射的混沌优化算法. 控制与决策, 2005, 20(2): 179 – 182.)

作者简介:

李锦键 博士研究生, 研究方向为可再生能源发电系统与控制、微电网技术, E-mail: lijinjian0326@163.com;

王兴贵 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源发电系统与控制、微电网技术、电力电子与电力传动等, E-mail: wangxg8201@163.com;

李 昱 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电系统与控制、E-mail: liyu6968266@163.com;

丁颖杰 博士研究生, 研究方向为可再生能源发电系统与控制、微电网技术, E-mail: dingyj0820@126.com;

薛 晟 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为可再生能源发电系统与控制、微电网技术, E-mail: xueshenglut@126.com.