

基于MAS的多电力弹簧分布式协同控制策略

程启明¹, 沈章平¹, 张家领¹, 吴浩强², 程尹曼³

(1. 上海电力大学 自动化工程学院 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200090;

2. 上海电力公司 浦东供电公司, 上海 200120; 3. 上海电力公司 市北供电公司, 上海 200072)

摘要:为了解决单个电力弹簧无法满足整个微电网电能质量管理需求的问题,提升关键负荷的电压电能质量,依据多智能体系统,构建多电力弹簧分布式系统架构,采用离散一致性算法设计上层控制器,提出采用调制模型预测控制器设计下层控制器。MATLAB/Simulink仿真结果表明,当电网电压波动和非关键负荷变化时,采用所提分布式协同控制策略能够实现关键负荷电压稳定及系统频率快速整定,验证了所提分布式协同控制策略的正确性和有效性。并将所提调制模型预测控制策略与模型预测控制、比例积分控制策略进行仿真对比,验证了所提分布式协同控制策略的优越性。

关键词:多电力弹簧;分布式协同控制;多智能体系统;离散一致性算法;调制模型预测控制

中图分类号: TM71

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202301017

0 引言

微电网由于结构复杂、运行方式独特,一般都在电能质量方面问题,所以需要进行电能质量治理^[1-2]。电力弹簧(electric spring, ES)是一种安装在负载侧用于缓解可再生能源波动的电力电子装置。与其他无功补偿装置不同,ES重新考虑供需关系,以需求侧为导向,考虑负载响应,使得负载功率随着可再生能源功率的变动而变动,从而实现内部功率的平衡,为微电网的稳定运行提供了新思路。根据负荷的应用场合不同,ES系统中的负荷可划分为关键负荷(critical load, CL)和非关键负荷(non-critical load, NCL)2种,其中CL允许电能质量在极小范围内变化,NCL允许电能质量在较大范围内变化。通过ES将电网侧电压和能量波动转到NCL上,从而保证CL的电能质量^[3]。

自2012年ES被首次提出以来,多种不同结构的ES拓扑已被提出,文献[4]综述了ES的结构、原理、控制以及应用。ES有4种不同的结构:ES-1^[5]、ES-2^[6-7]、ES-3^[8]和ES-B2B^[9]。其中:ES-1的直流侧只有1个电容,缺少储能系统,仅能补偿无功功率,有效运行范围有限;ES-2将ES-1直流侧电容改为储能装置,可以同时补偿有功、无功功率,有效运行范围变大;ES-3除去了ES-2中NCL的限制,提高了运行界限;ES-B2B将直流侧储能装置变为双向背靠背式逆变器,进一步提升了运行范围,但其应用范围有

限。因此,本文ES选用ES-2。在ES控制策略方面,文献[11]给出了有功、无功控制方案,但系统的动态控制性能不强,鲁棒性一般;文献[12]给出了变换器基于前馈解耦算法的功率控制方案,提高了系统响应速度,但并未将ES用于提升电能质量。

上述控制策略都是基于单个ES,实际情况下单个ES往往无法满足微电网电能质量管理的需求,需要在微电网中接入多个ES,对于多电力弹簧(multi-electric spring, MES)的控制策略国内外学者也有一定的研究。下垂控制作为分布式系统常用的方法,最先被应用到MES的控制中,通过下垂控制,能够实现ES的无功功率协调控制^[13-14]。为解决下垂控制精度不足的问题,一致性控制被应用到MES的控制中,通过依赖通信网络之间的信息交互,实现多个ES输出电压的快速精准分配^[15-16]。目前关于MES之间的控制器多是从控制性能方面考虑,并未考虑系统全局稳定性,当系统面对外部扰动或参数摄动时,系统稳定性和鲁棒性有待提高。

针对上述问题,多智能体系统(multi-agent system, MAS)被引入MES系统,这样可以保证ES之间协调稳定运行,并采用了上、下分层控制的分布式协同控制(distributed collaborative control, DCC)策略^[17],但该分层控制中下层控制器采用传统比例积分(proportional integral, PI)控制,难以得到满意的控制效果,其原因是PI控制器是一种线性单变量控制器,而ES为非线性多变量对象。为此,模型预测控制(model predictive control, MPC)被应用于ES控制中^[18],但MPC存在开关频率变化不定、输出电流纹波大的问题。

为了解决上述MES的分层控制问题,本文提出了新的分层控制方法。对于下层控制器,本文提出采用调制模型预测控制(modulation model predic-

收稿日期:2022-08-01;修回日期:2022-12-01

在线出版日期:2023-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61905139);上海市电站自动化技术重点实验室项目(13DZ2273800)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61905139) and Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology(13DZ2273800)

tive control, MMPC)算法来克服 MPC 存在的开关频率变化不定的问题;对于上层控制器,采用离散一致性算法(discrete consistency algorithm, DCA)来设计。DCA 控制和 MPC 虽为已有控制方法,但本文将两者相结合,并在此基础上对 MPC 策略进行了改进,采用 MMPC 解决了开关频率变化问题,从而实现了 MES 分层协调控制。最后在 MATLAB / Simulink 软件平台上通过仿真验证了本文所提 DCC 策略的有效性和优越性。

1 单个 ES 的拓扑结构和数学模型

1.1 单个 ES 的拓扑结构

图 1 为单个 ES 及其应用的典型结构框图。图中: L_f 、 C_f 分别为滤波电感、电容; R 、 L 分别为线路的电阻、电感; V_{DC} 、 v_G 分别为直流侧电压、电网电压; i_0 、 i_L 分别为输电线路、逆变器输出的电流; v_{ES} 、 v_i 分别为 ES、逆变器的输出电压; v_s 、 v_{nc} 分别为 CL 阻抗 Z_c 上的电压(也为公共连接点(point of common coupling, PCC)处电压)、NCL 阻抗 Z_{nc} 上的电压; i_c 、 i_{nc} 分别为流过 Z_c 、 Z_{nc} 的电流。由图可见,ES 包含双向直流电源、电压源逆变器和 LC 低通滤波器。智能负载(smart load, SL)包含 ES 和 Z_{nc} , ES 系统负载包含 Z_c 、 Z_{nc} 和 ES 本身。当电网能量出现波动情况时,ES 将电网侧能量和电压的波动转至 Z_{nc} 上,并通过调节 Z_{nc} 上的电压来实时控制 Z_c 上的电压,使其稳定在给定参考值上。由于 i_{nc} 与 v_{ES} 之间存在相位差,从而使 ES 系统的有功与无功之间形成转换。

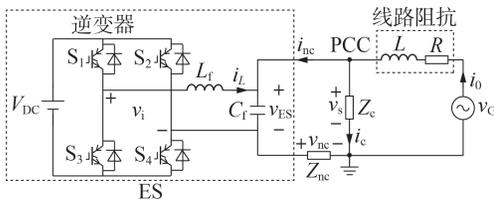


图1 单个ES及其应用的典型系统拓扑结构
Fig.1 Typical system topology of single ES and its application

在实际应用中,单个ES无法满足微电网电能质量管理的需求,往往需要在不同负载处安装多个ES以实现电压和频率稳定。含有MES的分布式微电网系统结构如图2所示。为不失一般性,图中MES以4个为例,4段母线通过线路阻抗连接,每段母线由一个图1所示的ES典型拓扑结构构成,包括ES、CL和NCL,电网侧由交流电源和风、光等间歇性可再生能源组成。图中: R_{12} 和 L_{12} 、 R_{23} 和 L_{23} 、 R_{34} 和 L_{34} 分别为ES1与ES2之间、ES2与ES3之间、ES3与ES4之间的线路电阻和电感; R_{c1} 和 R_{nc1} 、 R_{c2} 和 R_{nc2} 、 R_{c3} 和 R_{nc3} 、 R_{c4} 和 R_{nc4} 分别为ES1—ES4的CL和NCL的电阻。

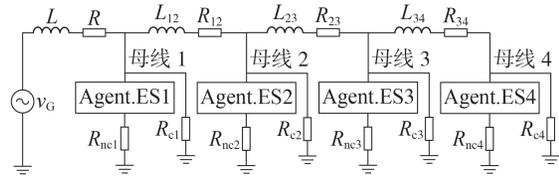


图2 含有MES的分布式微电网系统结构图
Fig.2 Structure diagram of distributed microgrid system with MES

1.2 单个ES的数学模型

在ES输出侧,由基尔霍夫定律可得到ES系统的模型关系式为:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{DC}}{2} m - v_{ES} \\ C_f \frac{dv_{ES}}{dt} = i_L - \frac{v_{ES}}{R_c + R_{nc}} + \frac{R_c i_0}{R_c + R_{nc}} \\ L \frac{di_0}{dt} = \frac{R_c v_{ES}}{R_c + R_{nc}} - \frac{(RR_c + R_c R_{nc} + R_{nc} R) i_0}{R_c + R_{nc}} + v_G \\ v_s = \frac{R_c}{R_c + R_{nc}} v_{ES} + \frac{R_c R_{nc}}{R_c + R_{nc}} i_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_c 、 R_{nc} 分别为CL、NCL的电阻; m 为调制比。

逆变器的控制一般首先需要采用坐标系间变换把交流量转成直流量,以便于系统分析与控制。针对图1所示的单相逆变器,由于缺少 dq 旋转变换中必需的正交信号,需要构建虚拟的正交分量,再进行坐标变换。本文通过高通滤波器构建出虚拟正交分量,ES系统中 Z_c 上的电压可用虚拟正交分量在 $\alpha\beta$ 坐标系下的合成矢量 $v_{\alpha\beta}$ 表示为:

$$v_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\omega t + \varphi) \\ V_m \sin(\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: v_α 、 v_β 分别为电压的 α 、 β 轴分量; V_m 、 ω 、 φ 分别为电压的幅值、角频率、初始相位。

合成矢量 $v_{\alpha\beta}$ 通过 $\alpha\beta/dq$ 坐标变换可得 dq 坐标系下的合成矢量 v_{dq} 为:

$$v_{dq} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta/dq} \begin{bmatrix} V_m \cos(\omega t + \varphi) \\ V_m \sin(\omega t + \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos \varphi \\ V_m \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_{\alpha\beta/dq} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: v_d 、 v_q 分别为电压的 d 、 q 轴分量; $T_{\alpha\beta/dq}$ 为 $\alpha\beta/dq$ 坐标变换矩阵。

将式(1)的ES系统关系式变换到 dq 坐标系下,可得 dq 坐标系下的模型关系式为:

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{id} \\ v_{iq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{ESd} \\ v_{ESq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L_f \\ -\omega L_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{ESd} \\ v_{ESq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega C_f \\ -\omega C_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ESd} \\ v_{ESq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} + \frac{R_c}{R_c + R_{nc}} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{R_c + R_{nc}} \begin{bmatrix} v_{ESd} \\ v_{ESq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} - \frac{R_c}{R_c + R_{nc}} \begin{bmatrix} v_{ESd} \\ v_{ESq} \end{bmatrix} - \frac{RR_c + R_c R_{nc} + R_{nc} R}{R_c + R_{nc}} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{Gd} \\ v_{Gq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:下标 d, q 分别表示相关变量的 d, q 轴分量。

2 基于 MAS 的 MES 分布式协同控制器设计

2.1 MAS 与 MES 分布式系统架构设计

MAS 是指一群有智能的个体所组成的整体。具有智能的个体被称作智能体,指在某一环境下,能持续自主发挥作用的计算实体。智能体工作时的框图见附录 A 图 A1,通过传感器对周围环境进行感知,在通信机制的帮助下作用于对周围环境中具有知识、信息等的其他智能体^[19-20]。构建 MAS,可以实现让每个能够独立控制的智能体之间通过相互协作完成更复杂更智能的整体控制目标。

根据 MAS 的工作原理和基本结构分析,分布式多智能体结构具备灵活性高、稳定性强等特点,能够有效协调多个 ES 系统之间稳定运行。将微电网中的每一个 ES 都看作一个智能体,这样可以保证 MES 之间协调稳定运行。一致性问题就是在 MAS 中所有智能体均趋向同一的状态,这是 MAS 协调控制策略中的核心问题。MES 的主要控制目标是实现母线电压和频率的稳定,故解决 MES 的协调控制是实现 DCC 的关键。因此,本文采用分布式结构构建 MES,其总体架构见附录 A 图 A2。以 4 个 ES 作为一个智能体群并入微电网,其整体控制结构包含 2 级控制,即上层控制和下层控制,其中下层控制用于对单个 ES 进行独立控制,上层控制用于对 4 个 ES 之间进行协调控制。2 级控制之间通过 MAS 进行信息交互。

2.2 基于 MAS 的 MES DCC 策略

下面分上层控制、下层控制和整体控制 3 个部分介绍本文的 DCC 策略的具体设计过程。

2.2.1 上层控制算法的设计

本文上层控制器采用 DCA 进行设计^[20-21],通过 ES 与相邻 ES 交换功率信息,即可完成母线电压和频率的自动更新,实现 ES 之间的全局稳定性控制。

对上层控制器的设计主要需达到如下 2 个目的。

1) 各母线平均电压一致和 ES 无功功率精准分配,即:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \left| \sum_{i=1}^n v_{s,i}(t) / n - V_{ref} \right| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \left| Q_{es,i}(t) / Q_{es,i}^{max} - Q_{es,j}(t) / Q_{es,j}^{max} \right| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_{ref} 为母线期望工作电压有效值,设定为 220 V; $v_{s,i}(t)$ 为 t 时刻的母线 i 电压; n 为 ES 总数量, $n=4$; $Q_{es,i}^{max}$ 、 $Q_{es,j}^{max}$ 分别为母线 i, j 上的 ES 最大无功功率; $Q_{es,i}(t)$ 、 $Q_{es,j}(t)$ 分别为 t 时刻母线 i, j 上的 ES 无

功功率实际值。

2) 系统频率稳定和 ES 有功功率精准分配,即:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \left| \omega_i(t) - \omega_{ref} \right| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \left| P_{es,i}(t) / P_{es,i}^{max} - P_{es,j}(t) / P_{es,j}^{max} \right| = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω_{ref} 为系统期望工作频率,设定为 50 Hz; $\omega_i(t)$ 为 t 时刻母线 i 的系统工作频率; $P_{es,i}^{max}$ 、 $P_{es,j}^{max}$ 分别为母线 i, j 上的 ES 最大有功功率; $P_{es,i}(t)$ 、 $P_{es,j}(t)$ 分别为 t 时刻母线 i, j 上的 ES 有功功率实际值。

ES 的最大功率输出受到 NCL 阻抗的影响,本文采用的 NCL 是纯电阻,则 $P_{es,i}^{max}$ 和 $Q_{es,i}^{max}$ 满足:

$$P_{es,i}^{max} = \frac{V_{ref}^2}{4R_{nc}}, \quad Q_{es,i}^{max} = \frac{V_{ref}^2}{2R_{nc}} \quad (10)$$

为满足上层控制器设计要求,附录 A 图 A3 建立了 4 个 ES 通信网络的拓扑。由于各个 ES 之间只与网络相应的 ES 交换信息,图中通信网络的 Laplace 矩阵 L 可表示为:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} = D - A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,矩阵 L 对应的特征向量 $I_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$, 即:

$$L I_1 = O_1 \quad (12)$$

式中: $O_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

又由于矩阵 L 为对称矩阵,则式(12)可变换为:

$$I_1^T L = (L I_1)^T = O_1 \quad (13)$$

各个 ES 可根据本地和相邻 ES 的有功和无功功率信息来求取有功和无功误差值,即设计一致性控制律为:

$$\begin{cases} \delta_i^p = \lambda^p \sum_j a_{ij} (P_{es,j} / P_{es,j}^{max} - P_{es,i} / P_{es,i}^{max}) \\ \delta_i^q = \lambda^q \sum_j a_{ij} (Q_{es,j} / Q_{es,j}^{max} - Q_{es,i} / Q_{es,i}^{max}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: δ_i^p 、 δ_i^q 分别母线 i 上电压、频率的误差信号; λ^p 、 λ^q 分别为 ES 的有功功率与系统频率之间、无功功率与母线电压之间的耦合系数; a_{ij} 为母线 i 上的 ES 与母线 j 上的 ES 之间的通信程度。

将各母线上的误差信号作为补偿叠加到母线电压上,即可得母线 i 的电压参考值 $v_{bus,i}$ 和系统频率参考值 $\omega_{ref,i}$ 为:

$$\begin{cases} v_{bus,i} = V_{ref} + \delta_i^q \\ \omega_{ref,i} = \omega_{ref} + \delta_i^p \end{cases} \quad (15)$$

根据设计出的一致性控制律及一致性原理,即可得到基于离散一致性原理的 MES 上层控制算法的流程,如附录 A 图 A4 所示。

2.2.2 下层控制算法的设计

根据图A2所示的ES分布式系统架构,经过上层的一致性控制方法通过与相邻ES进行数据通信,使得所有ES的控制目标达成一致,将误差信号传递到下层控制中。为实现对母线电压和系统频率参考值的快速跟踪,下层控制选择的控制算法需要具备性能优异、响应速度快、全局动态性能强等优点。

传统PI控制适用于单变量的线性对象控制,在用于像ES这种多变量的非线性对象控制时性能较差,控制精度不高,鲁棒性也不强。MPC能够用于带约束限制的非线性对象控制,其系统结构简单,动态响应快,但开关频率并不固定,导致输出电流纹波大。因此,本文提出采用MMPC的下层控制算法。通过动态调节ES的开关模态,设计母线电压和频率最优的价值函数,实现快速抑制母线电压和频率波动;并构建额外价值函数,以解决MPC存在的开关频率不固定导致输出电流纹波大的问题,使得脉冲分布更有规则,从而固定开关频率。

1)MPC及其存在的问题。

根据MPC的基本原理,首先对ES的开关状态进行量化分析。定义ES的开关状态 $S=[S_1, S_2, S_3, S_4]$,其中 $S_i(i=1, 2, 3, 4)$ 取0和1分别表示开关 S_i 处于关断和导通状态。则可以根据ES的基本原理得到ES开关状态模态图,如附录A图A5所示。

根据基尔霍夫电压定律,可对ES的4个开关状态分别建立预测模型,可以得到:

$$L_f \frac{di_L}{dt} = \begin{cases} V_{DC} - v_{ES} & S=[1, 0, 0, 1] \\ -v_{ES} & S=[1, 1, 0, 0] \text{ 或 } [0, 0, 1, 1] \\ -V_{DC} - v_{ES} & S=[0, 1, 1, 0] \end{cases} \quad (16)$$

当采样周期为 T_s 时,将式(16)离散化,可得到ES的电感电流离散时间模型为:

$$i_L(k+1) = \begin{cases} \frac{T_s}{L_f} (V_{DC}(k) - v_{ES}(k)) + i_L(k) & S=[1, 0, 0, 1] \\ -\frac{T_s}{L_f} v_{ES}(k) + i_L(k) & S=[1, 1, 0, 0] \text{ 或 } [0, 0, 1, 1] \\ -\frac{T_s}{L_f} (V_{DC}(k) + v_{ES}(k)) + i_L(k) & S=[0, 1, 1, 0] \end{cases} \quad (17)$$

式中: k 表示当前采样时刻; $k+1$ 表示下一采样时刻。

将式(17)的离散开关时间状态与ES数学模型结合,可得到ES在4个开关状态下母线的输出电压。根据输出电压和频率建立MMPC的价值函数 J_i 为:

$$J_i = |v_{bus,i}(k+1) - v_{s,i}(k+1)| + |\omega_{ref,i}(k+1) - \omega_i(k+1)| \quad (18)$$

根据设计的价值函数和预测模型,即可得到MPC应用于MES的控制流程图,如附录A图A6所示。首先,从上层控制得到母线电压参考值 $v_{bus,i}(k)$ 和系统频率参考值 $\omega_{ref,i}(k)$,并测量得到所需要的电

压、电流等物理参数;其次,根据式(17)分别计算ES在4个开关状态下下一个采样时刻的离散电流;然后,结合ES数学模型,计算下一个采样时刻的母线电压和频率;最后,根据式(18)的价值函数,选取误差最小的开关状态,并将其应用到ES中,以实现每个ES对其母线电压参考值的快速跟踪。

MPC虽然控制结构简单且能实现快速动态响应,但存在开关频率不固定的缺点,导致输出电流纹波大。

2)MMPC策略。

针对MPC存在的问题,本文采用固定开关频率方法,通过将空间矢量调制和MPC方法相结合,得到了MMPC方法^[21]。该方法利用MPC离散的模型代替传统的空间矢量调制模块,能够得到更好的动态响应,同时运用调制的思想,使得脉冲分布更有规则,从而固定开关频率。

本文采用了一种以所有开关状态中加权误差的均方根值最小的矢量组为最优的设计思路来构建额外价值函数,该价值函数可以筛选出使系统参考值与预测值加权误差最小的开关状态,并且可以计算出相应的加权系数。均方根值 ε^2 为:

$$\varepsilon^2 = (e_1^2 d_1^2 + e_2^2 d_2^2 + e_3^2 d_3^2 + e_4^2 d_4^2) / 4 \quad (19)$$

式中: $e_1 - e_4$ 为4个开关状态作用下的控制误差; $d_1 - d_4$ 为4个开关状态作用下的占空比。

根据式(19),可将额外价值函数 G 设计为:

$$G = J_1 d_1^2 + J_2 d_2^2 + J_3 d_3^2 + J_4 d_4^2 \quad (20)$$

以式(20)的额外价值函数作为评价标准,可求出权重误差的均方根值最小的空间电压矢量组,即使系统的控制轨迹最接近参考轨迹的最优矢量组。

MMPC在每次滚动优化中,除了计算每组中各个开关状态所对应的价值函数值之外,还要求出使得额外价值函数 G 取最小值时的 $d_1 - d_4$ 。此时 $J_1 - J_4$ 可以通过式(20)计算得出,相当于常数,而 $d_1 - d_4$ 相当于4个未知变量,此时求 G 最小值的问题可以看成数学中求多元函数的极值问题,其约束条件为:

$$\begin{cases} 0 < d_1 < 1, & 0 < d_2 < 1 \\ 0 < d_3 < 1, & 0 < d_4 < 1 \\ d_1 + d_2 + d_3 + d_4 = 1 \end{cases} \quad (21)$$

根据拉格朗日乘子法,可对式(20)求得极值,进一步求得占空比 $d_1 - d_4$ 为:

$$\begin{cases} d_1 = N/J_1, & d_2 = N/J_2 \\ d_3 = N/J_3, & d_4 = N/J_4 \\ N = 1/(J_1^{-1} + J_2^{-1} + J_3^{-1} + J_4^{-1}) \end{cases} \quad (22)$$

在图A6所示的常规MPC基础上,增加根据式(21)和式(22)设计的额外价值函数,即可得基于MMPC的下层控制器。

2.2.3 DCC的整体结构

将上、下层控制结合起来,建立如图3所示的基于MAS的MES DCC策略。

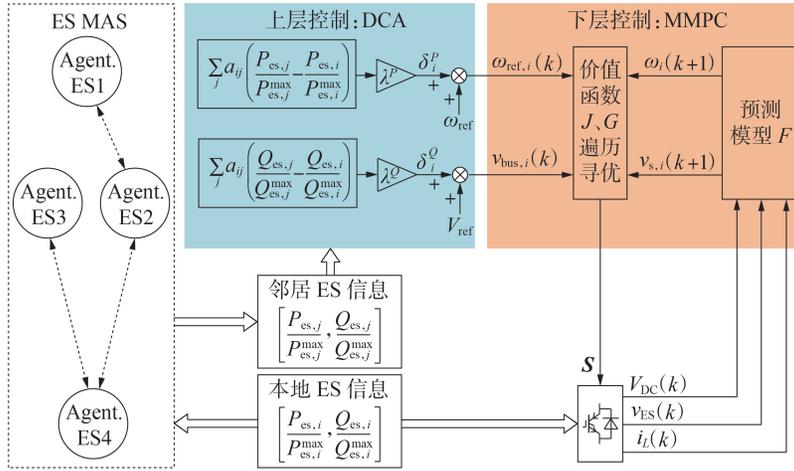


图 3 MES DCC 框图

Fig.3 Block diagram of MES DCC

首先,ES 根据测量到的电流、电压信息,计算得到每个本地 ES 的功率信息 $[P_{es,i}/P_{es,i}^{\max}, Q_{es,i}/Q_{es,i}^{\max}]$,将其通过分布式 MAS 传送给相邻的 ES 智能体,形成邻居 ES 的功率信息 $[P_{es,j}/P_{es,j}^{\max}, Q_{es,j}/Q_{es,j}^{\max}]$;其次,将所得到的本地和邻居 ES 信息输送到上层控制中,根据式(14)所示的一致性控制律得到有功功率和无功功率误差信号;然后,根据式(15)将误差信号作为补偿得到各母线电压参考值和系统频率参考值,传输到下层控制中;最后,在下层控制中,根据对 ES 在 4 个开关状态下电压和频率的目标函数遍历寻优,找到最优的开关状态输送给 ES,即可在 DCC 前提下实现 ES 电压和频率的误差跟踪。

2.3 ES 稳态运行的界限分析

为了确保 ES 运行在其稳态运行范围内,下面对 ES 系统的稳态界限进行讨论。

由图 1 中的 ES 系统结构框图可得:

$$\begin{cases} V_G = IZ + V, & V_S = V_{ES} + V_{nc} \\ I = I_c + I_{nc} = V_s/Z_c + V_{nc}/Z_{nc} \end{cases} \quad (23)$$

式中: Z 为线路阻抗; V_{ES} 、 V_S 、 V_{nc} 、 V_G 分别为 ES 输出、CL、NCL、电网的电压相量; I 、 I_c 、 I_{nc} 分别为输电线路、CL、NCL 的电流相量。

将式(23)中的 3 个公式联立,可以整理得到:

$$V_G = V_S(1 + Z/Z_{nc} + Z/Z_c) - V_{ES}Z/Z_{nc} \quad (24)$$

由式(24)可得 ES 输出的电压为:

$$V_{ES} = V_S(1 + Z_{nc}/Z + Z_{nc}/Z_c) - V_G Z_{nc}/Z \quad (25)$$

由式(25)可见, V_{ES} 与 V_S 、 V_G 、 Z 、 Z_c 和 Z_{nc} 相关。

V_{ES} 的幅值 V_{ES} 满足如下限制条件:

$$\begin{cases} V_{ES, \min, N} \leq V_{ES} \leq V_{ES, \max, N} \\ V_{sref} - V_{nc, \min, N} \leq V_{ES} \leq V_{sref} - V_{nc, \max, N} \\ V_{sref} - Z_{nc} I_{nc, \min, N} \leq V_{ES} \leq V_{sref} - Z_{nc} I_{nc, \max, N} \end{cases} \quad (26)$$

式中: V_{sref} 为 Z_c 的参考电压; $V_{nc, \min, N}$ 、 $V_{nc, \max, N}$ 分别为 Z_{nc} 电压额定值的最小值、最大值; $V_{ES, \min, N}$ 、 $V_{ES, \max, N}$ 分别

为 ES 输出的电压额定值的最小值、最大值; $I_{nc, \min, N}$ 、 $I_{nc, \max, N}$ 分别为 Z_{nc} 电流额定值的最小值、最大值。

由式(25)、(26)可得 V_{ES} 的稳态工作界限为:

$$V_{ES} = \begin{cases} V_{ES, \max, N} & v_G < V_{G, \min} \\ V_S \left(1 + \frac{Z_{nc}}{Z} + \frac{Z_{nc}}{Z_c} \right) - \frac{Z_{nc}}{Z} V_G & V_{G, \min} \leq v_G \leq V_{G, \max} \\ V_{ES, \min, N} & v_G > V_{G, \max} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $V_{G, \min}$ 、 $V_{G, \max}$ 分别为电网电压 v_G 的最小值、最大值。

假设图 1 中 ES 逆变器占空比为 K_{PWM} , 那么式(1)的逆变器方程可写为:

$$L_f \frac{di_L}{dt} = K_{PWM} V_{DC} - v_{ES} \quad (28)$$

由式(27)、(28)可得 V_{DC} 的稳态工作界限为:

$$V_{DC} = \begin{cases} V_{DC, \max, N} & v_G < V_{G, \min} \\ \frac{V_S \left(1 + \frac{Z_{nc}}{Z} + \frac{Z_{nc}}{Z_c} \right) - \frac{Z_{nc}}{Z} V_G}{K_{PWM}} + L_f \frac{di_L}{dt} & V_{G, \min} \leq v_G \leq V_{G, \max} \\ V_{DC, \min, N} & v_G > V_{G, \max} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $V_{DC, \min, N}$ 、 $V_{DC, \max, N}$ 分别为 ES 直流侧电压额定值的最小值、最大值。

根据式(27)、(29)可知,当电网电压波动很大时,ES 将超出其稳定工作范围,通过调节 Z 、 Z_c 和 Z_{nc} 阻抗关系或者增加 ES 直流侧储能电池的容量,可以扩展 ES 的稳态工作范围。

3 仿真分析

本文在 MATLAB / Simulink 软件仿真平台上搭建如图 2 所示的 MES 并网控制系统模型,并通过把本文所提 DCC 策略(即上层采用 DCA,下层采用 MMPC,简称 DCA-MMPC 策略),与常用的 DCA-PI 控制(即上层采用 DCA,下层采用 PI 控制)、DCA-MPC(即上

层采用DCA,下层采用MPC)策略进行仿真对比,以说明本文所提DCA-MMPC策略的有效性与其优越性。系统实验参数见附录A表A1。

下面在电网电压波动、NCL波动2种不同工况下进行仿真,以验证本文所提DCA-MMPC策略在MES微电网系统下的控制性能。

3.1 电网电压波动工况

假设电网电压 v_c 在1s时由初始值220V升高至240V,并在2s时跌落回220V,以此模拟电网电压波动情况下的控制系统运行情况。

图4为微电网系统未安装ES时0~3s内各母线电压的波动状态。由图可见,在1~2s内,母线1的电压升高至236.2V,超过了国家标准中对于电能质量供电电压偏差要求的235.4V。

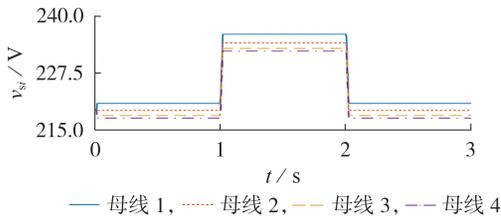


图4 未接入ES时各母线电压

Fig.4 Bus voltages when ES is not connected

当微电网系统在各条母线上安装ES后,采用本文所提DCA-MMPC策略,各CL(即各母线)、NCL的电压曲线如图5所示。由图5(a)可见,当微电网安装MES后,各母线电压都能稳定在220V附近,误差不超过 ± 5 V,实现了电网电压波动情况下母线电压的稳定控制;由图5(b)可见,各ES将电压波动由源侧转到各NCL,因此各NCL电压与源侧电压波动基本一致,各NCL分担了源侧电压部分波动。对比图4和图5可知,本文所提DCA-MMPC策略能够有效抑制电网电压波动。

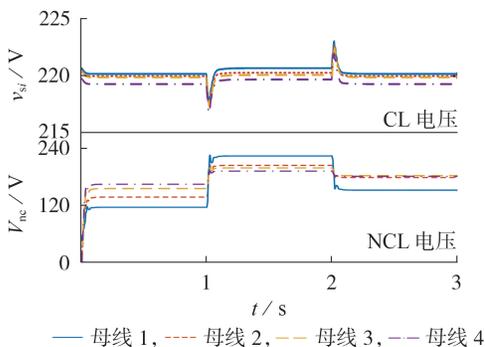


图5 DCA-MMPC下CL和NCL的电压曲线

Fig.5 Voltage curves of CL and NCL under DCA-MMPC

为了验证本文所提DCA-MMPC策略的优越性,下面将其与DCA-PI控制、DCA-MPC策略进行对比仿真。附录A图A7、A8分别为采用DCA-PI控制、

DCA-MPC策略时各CL(即各母线)和NCL的电压曲线。对比图5与图A7、A8可以看出,由于DCC中下层控制采用了MMPC,能够通过快速寻优找到ES的最佳工作模态,实现母线电压的快速跟踪,因此,相较于DCA-PI控制、DCA-MPC,DCA-MMPC的控制效果更好,其响应速度更快、响应时间更短、超调更小。

附录A图A9为3种控制策略下母线1电压的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)对比曲线。由图可见,3种控制策略下的THD分别为17.14%、1.88%和0.13%,进一步验证了DCA-MMPC策略下的电压谐波含量比DCA-MPC和DCA-PI控制策略下的低,且波形质量更高。

根据图5和图A7—A9,可得3种控制策略的性能指标对比见表1。根据表1可以更清晰地看出:DCA-MPC和DCA-MMPC在响应速度、谐波含量等方面均优于DCA-PI控制;而DCA-MMPC相较于DCA-MPC,谐波含量更少,系统计算负担更小,波形质量更高,更有效地改善了微电网电能质量。

表1 3种控制策略的性能指标对比

Table 1 Comparison of performance indexes among three control strategies

控制策略	稳定时间/s	超调量/%	THD/%
DCA-PI控制	0.24	2.27	17.14
DCA-MPC	0.12	1.36	1.88
DCA-MMPC	0.12	1.35	0.13

电网电压波动时系统频率如图6所示。当ES未接入微电网时,系统频率在1~2s内下降到49.79Hz,超过国家标准中电力系统频率偏差在 (50 ± 0.5) Hz内的要求,对电网的稳定运行造成威胁;当ES接入微电网后,系统频率经过小幅度波动后,能够持续稳定在50Hz,使得电网持续稳定运行。相较于DCA-PI控制,DCA-MPC和DCA-MMPC都能经过更小幅度的波动,更快地使频率达到稳定。

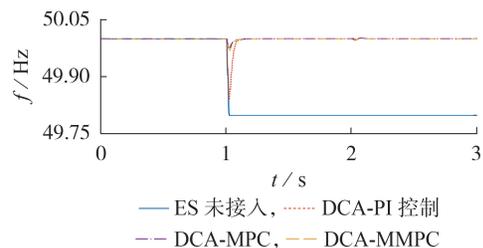


图6 电网电压波动时系统频率

Fig.6 System frequency when grid voltage fluctuates

3.2 NCL波动工况

假设电网电压恒定为220V,在1s时母线4上的NCL电阻从 10Ω 增至 20Ω ,并在2s时减回 10Ω ,以此模拟NCL波动工况下的控制系统运行情况。

图7为NCL波动时DCA-PI控制、DCA-MPC和

DCA-MMPC策略下的各母线电压曲线。由图可知:当母线4上NCL变化时,各母线电压在经过微小波动后仍能稳定在220 V左右,相较于DCA-PI控制,DCA-MPC和DCA-MMPC的响应速度更快,稳定性更高,控制效果更好;而DCA-MMPC相较于DCA-MPC,系统计算负担更小,波形质量更高,能够更好地改善微电网电能质量。

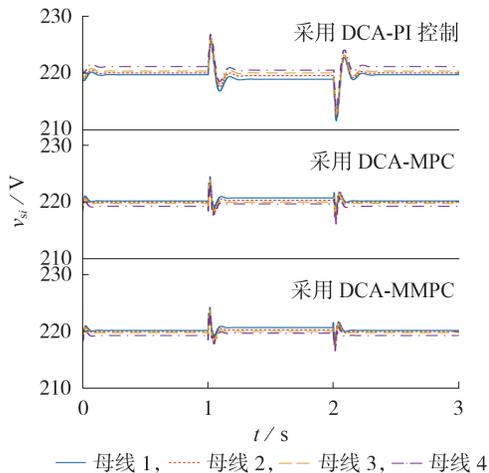


图7 NCL波动时3种控制策略下各母线电压
Fig.7 Bus voltages under three control strategies when NCL fluctuates

图8为NCL波动时系统频率变化曲线。由图可知,若未接入ES,则系统频率会提升到50.04 Hz且不会返回50 Hz,虽然未超过国家标准,但仍会对电网的稳定运行造成一定威胁。相较于DCA-PI控制,DCA-MPC和DCA-MMPC下频率的波动幅度更小,能够更快地返回50 Hz并保持稳定,而采用所提DCA-MMPC策略能够使得系统频率始终保持在50 Hz附近,且波动小于0.01 Hz。

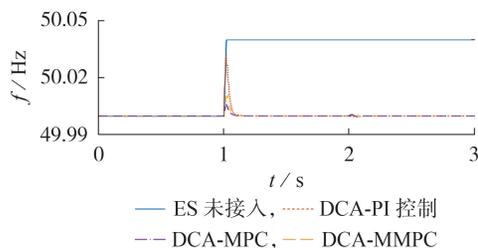


图8 NCL波动时系统频率
Fig.8 System frequency when NCL fluctuates

综上所述,本文所提DCA-MMPC策略能快速准确地调节微电网的电压和频率,有效降低微电网运行过程中所产生波动的影响,改善了微电网电能质量。

4 结论

本文将基于MAS的DCC的上下分层策略用于MES系统控制中,并对下层提出了采用MMPC策略。

通过理论分析和仿真对比可以得到如下结论:

1)对于下层控制,相较于传统PI控制,MPC和MMPC都能达到较好的控制效果,但MMPC相较于MPC,固定了其开关频率,减少了谐波含量,减轻了系统计算负担,改善了波形质量;

2)对于上层控制,采用DCA,通过与相邻ES进行数据通信,使得所有ES的控制目标达成一致,并将误差信号传递到下层控制中;

3)MAS具有灵活性高、稳定性强等特点,采用分布式结构构建MES系统,能够有效协调多个ES系统之间的稳定运行。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1):1-18.
LIU Chang,ZHUO Jiankun,ZHAO Dongming,et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(1):1-18.
- [2] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术,2020,46(5):1460-1475.
YUAN Zhichang,GUO Peiqian,LIU Guowei,et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering,2020,46(5):1460-1475.
- [3] 龙军,郑宇琦,卢泉,等. 基于Z源电力弹簧和简化情感控制的微电网电压和频率控制方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):118-124.
LONG Jun,ZHENG Yuqi,LU Quan,et al. Voltage and frequency control method of microgrid based on Z-source ES and simplified BELBIC[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):118-124.
- [4] 尹发根,王淳. 电力弹簧研究进展:原理、拓扑结构、控制和应用[J]. 电网技术,2019,43(1):174-184.
YIN Fagen,WANG Chun. Review of electric spring:principle, topologies, control and applications[J]. Power System Technology,2019,43(1):174-184.
- [5] LEE C K,CHAUDHURI B,HUI S Y. Hardware and control implementation of electric springs for stabilizing future smart grid with intermittent renewable energy sources[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics,2013,1(1):18-27.
- [6] TAN S C,LEE C K,HUI S Y R. General steady-state analysis and control principle of electric springs with active and reactive power compensations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(8):3958-3969.
- [7] 吕广强,许文敏,王谱宇. 基于变论域模糊PI自适应控制的电力弹簧控制策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(18):172-178.
LÜ Guangqiang,XU Wenmin,WANG Puyu. Electric spring control strategy based on variable universe fuzzy PI adaptive control[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(18):172-178.
- [8] 王青松. 电力弹簧若干关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2016.
WANG Qingsong. Research on some key technologies of electric spring[D]. Nanjing:Southeast University,2016.

- [9] AKHTAR Z, CHAUDHURI B, HUI S Y R. Smart loads for voltage control in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2):937-946.
- [10] CHAUDHURI N R, CHI K L, CHAUDHURI B, et al. Dynamic modeling of electric springs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5):2450-2458.
- [11] 程明, 王青松, 张建忠. 电力弹簧理论分析与控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10):2436-2444.
CHENG Ming, WANG Qingsong, ZHANG Jianzhong. Theoretical analysis and controller design of electric springs[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10):2436-2444.
- [12] 左武坚, 王青松, 程明, 等. 基于前馈解耦算法的单相电力弹簧功率控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14):159-165.
ZUO Wujian, WANG Qingsong, CHENG Ming, et al. Power control of single-phase electric spring based on feedforward decoupling algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14):19-165.
- [13] HUI S Y R, LEE C K, CHAUDHURI B, et al. Droop control of distributed electric springs for stabilizing future power grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3):1558-1566.
- [14] CHEN T, ZHENG Y, CHAUDHURI B, et al. Distributed electric spring based smart thermal loads for overvoltage prevention in LV distributed network using dynamic consensus approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4):2098-2108.
- [15] 薛花, 任春雷, 张晓雯, 等. 基于一致性理论的直流微电网多电力弹簧分布式电压平稳控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21):7285-7304.
XUE Hua, REN Chunlei, ZHANG Xiaowen, et al. Multi-spring distributed voltage stability control for DC microgrid based on consistency theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21):7285-7304.
- [16] 薛花, 张晓雯, 凌晨, 等. 考虑通信时延的直流微电网多电力弹簧电压平稳控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16):5434-5452.
- XUE Hua, ZHANG Xiaowen, LING Chen, et al. Multi-spring voltage stability control method for DC microgrid considering communication delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16):5434-5452.
- [17] CHEN Jie, YAN Shuo, YANG Tianbo, et al. Practical evaluation of droop and consensus control of distributed electric springs for both voltage and frequency regulation in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7):6947-6959.
- [18] ZHANG Tao, HAO Qiang, ZHENG Zheng, et al. An electric spring control strategy based on finite control set-model predictive control[J]. Journal European des Systemes Automatises, 2020, 53(4):461-468.
- [19] SUN T, JIA C, LIANG J, et al. Improved modulated model-predictive control for PMSM drives with reduced computational burden[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(14):3163-3170.
- [20] LI T F, LI H. A distributed optimization algorithm for multi-agent systems with limited communication[C]//2020 Chinese Control and Decision Conference(CCCD). Hefei, China:[s.n.], 2020:622-625.
- [21] WANG Z, XU J, SONG X, et al. Consensus conditions for multi-agent systems under delayed information[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs, 2018, 65(11):1773-1777.

作者简介:

程启明(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等(E-mail:chengqiming@sina.com);

沈章平(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为能源发电控制、电力电子控制等(E-mail:jzhangxin@qq.com)。

(编辑 李莉)

Multi-electric spring distributed collaborative control strategy based on MAS

CHENG Qiming¹, SHEN Zhangping¹, ZHANG Jialing¹, WU Haoqiang², CHENG Yinman³

(1. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Pudong Power Supply Company, Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200120, China;

3. North Power Supply Company, Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to solve the problem that single electric spring can not meet the power quality management requirements of whole microgrid and improve the voltage power quality of critical load, a distributed system architecture of multi-electric springs based on multi-agent system is constructed. The upper controller is designed by discrete consistency algorithm, and the lower controller is designed by modulation model predictive control(MMPC). The simulative results based on MATLAB/Simulink verify that when the power grid voltage fluctuates and the non-critical load changes, the distributed collaborative control(DCC) strategy can achieve the voltage stability of the critical load and the rapid adjustment of the system frequency, which shows the correctness and effectiveness of the proposed DCC strategy. In addition, the proposed MMPC strategy is compared with model predictive control and proportional integral control strategies by simulation, which verifies the superiority of the proposed DCC strategy.

Key words: multi-electric springs; distributed collaborative control; multi-agent system; discrete consistency algorithm; modulation model predictive control

附录 A

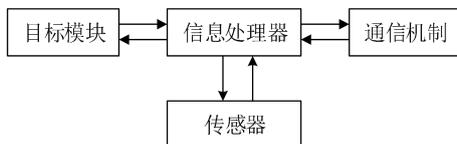
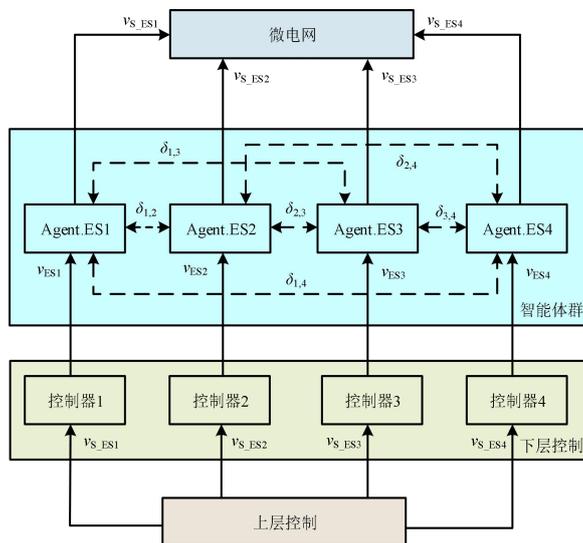


图 A1 智能体工作框图

Fig.A1 Working block diagram of Agent



---分布式 MAS 中的信号链路，用于传递 ES 之间的误差信息 $\delta_{m,n}(m,n=1,2,3,4)$

—分布式 ES 系统中的控制链路，用于输送系统间的控制信号

图 A2 MES 分布式系统的总体架构

Fig.A2 Overall architecture of MES distributed system

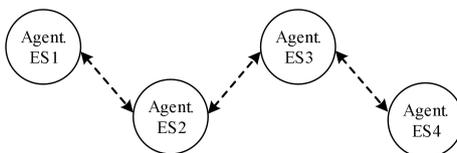


图 A3 分布式 ES 通信网络拓扑

Fig.A3 Topology of distributed ES communication network

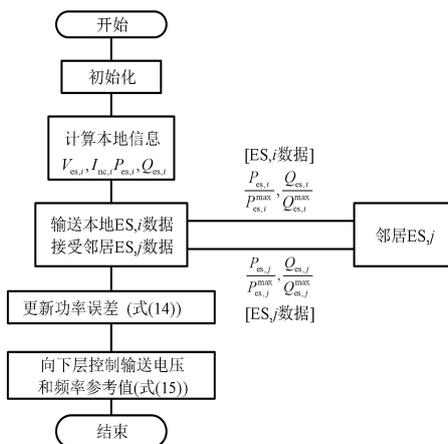


图 A4 上层控制算法的流程图

Fig.A4 Flowchart of upper control algorithm

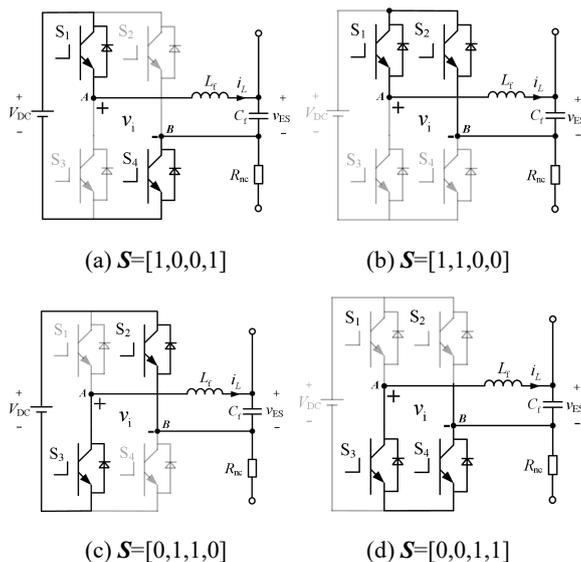


图 A5 ES 开关状态模式图

Fig.A5 Mode diagram of ES switching states

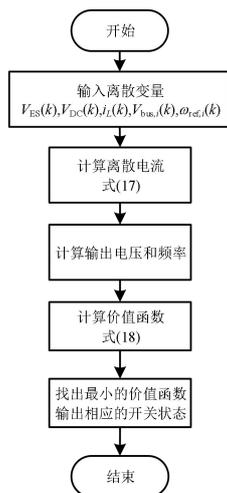


图 A6 MPC 流程图

Fig.A6 Flowchart of MPC

表 A1 系统实验参数

Table A1 Experimental parameters of system

参数	数值
电网电压 v_G/V	311
电网频率 f/Hz	50
ES1—ES4 的直流侧电压/V	700
ES1—ES4 之间的线路阻抗 Z_{12} 、 Z_{23} 、 Z_{23}/Ω	$0.02+j0.314$
ES1—ES4 的 NCL 阻抗 R_{nc1} 、 R_{nc2} 、 R_{nc3} 、 R_{nc4}/Ω	10
ES1—ES4 的 CL 阻抗 R_{c1} 、 R_{c2} 、 R_{c3} 、 R_{c4}/Ω	200
滤波电感 L_f/mH	2
滤波电容 $C_f/\mu F$	60
控制器采样频率/kHz	10

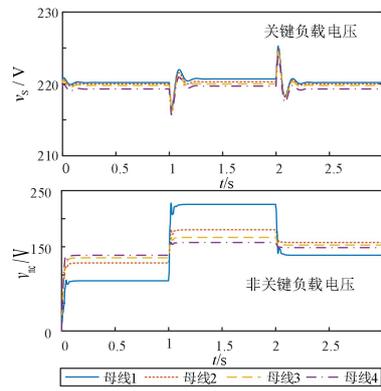


图 A7 DCA-PI 控制下 CL 和 NCL 的电压曲线

Fig.A7 Voltage curves of CL and NCL under DCA-PI control

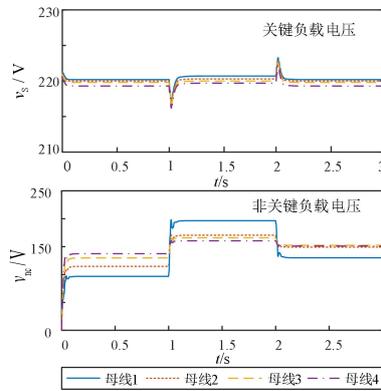


图 A8 DCA-MPC 下 CL 和 NCL 的电压曲线

Fig.A8 Voltage curves of CL and NCL under DCA-MPC

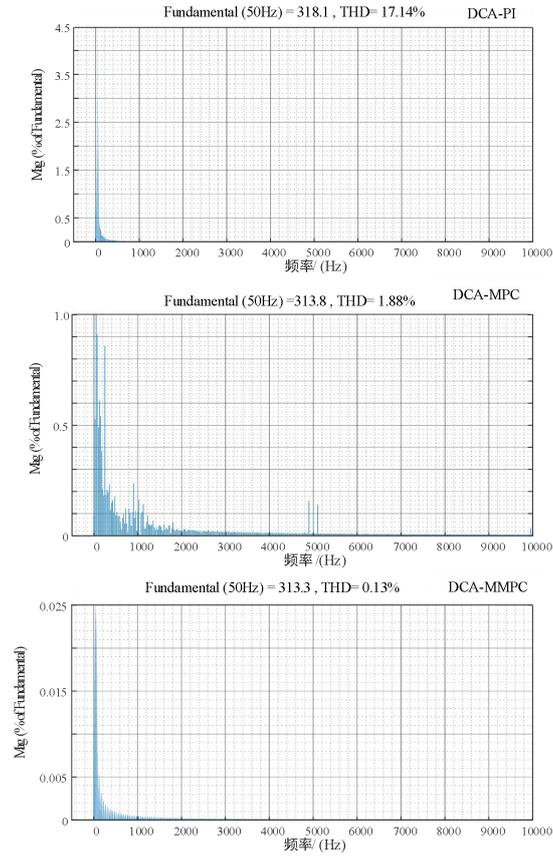


图 A9 3 种控制策略下母线 1 电压的 FFT 分析曲线

Fig.A9 FFT analysis curve of Bus 1 voltage under three control strategies