

微电网群功率优化控制

熊 雄,王江波,井天军,杨仁刚,叶 林

(中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要: 随着间歇性电源(分布式风电、光伏)在中、低压配电网中渗透率的提高,多个微电网可能共存于一个区域配电网中,各微电网间能量互济与协调控制的微电网群技术开始引起广泛的关注。以微电网研究为基础,分析了微电网群的典型特征及拓扑结构。以微电网群功率波动为研究对象,建立了微电网群功率波动熵值的动态调度模型,采用量子粒子群优化算法进行求解实现优化控制。仿真结果验证了所提微电网群功率优化控制方法的正确性和有效性。

关键词: 微电网群; 功率波动; 熵值模型; 量子粒子群算法; 功率控制; 优化

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.002

0 引言

多种类型的分布式电源(DG)以微电网的形式接入电网,是解决分布式电源无序接入、不可调度、供电可靠性低、电能质量差以及友好接入问题的有效方案^[1-3]。但受限于广域量测技术,微电网的供电范围、接入容量以及配置储能的大小有限,单个微电网仍然呈现低惯性,其参与电网联合调度和区域自治的能力有待进一步提高^[4-5]。

我国新能源发电由集中式发展正逐渐向分布式的方向转变,这使得分布式发电呈现高密度接入局部配电网的现象。目前,我国配电调度控制系统尚未形成成熟且具备远程调节、控制功能的系统,因此将高渗透率分布式电源以多个微电网接入系统,通过各微电网的自治调控及区域内多个微电网的协同调度可最大限度地适应大规模、多类型分布式电源接入的动态特性,而协同分散的调控可达到系统负载均衡,提高能源的利用效率^[6-8]。目前关于多个微电网组群运行的调控技术已获得一些研究成果,文献[9]将多种分布式电源进行集群,分析各分布式电源的多时间输出耦合特性,使其对外输出功率可调,达到友好捆绑、友好接入电网的目的,但并未对交换功率进行优化;文献[10]对多个微电网的集群特性进行了分析,但未对相互间的协调优化机理进行介绍;文献[11]对多个微电网中电压/频率的协调控制进行了研究,基于动作地域和时间长短提出了多微电网三层控制方法,以抑制母线电压波动及减少有功损耗,但该方法未考虑群控层的运行管理;文献[12]提出了一种基于遗传算法和线性/二次规划多层次调度算法的多目标优化模型,对多微电网潜在的经济、技术效益进行了评估。国内学者在国家 863 项目“微电网群高效可靠运行关键技术及示范”开展

下对多微电网的特征、运行控制方法、优化机制等关键技术进行了研究。文献[13]对微电网群的协调控制与优化机理进行了研究,基于分散结构采用协同优化达到系统优化的目标,即弱化了群一级的功能;文献[14]提出了一种微电网群互联互通的新方案,该方案认为未来微电网群的发展将是能源上的互联,使微电网群更加有效地提升辅助服务,并参与到多种形式的电力市场中。

本文首先分析了微电网群接入主动配电网的方式及特征,然后提出了配电网下多个微电网的功率协调优化模型,基于量子粒子群优化(QPSO)算法求解模型以提高优化算法的寻优能力;最后通过算例仿真计算对所提方法进行了验证。

1 微电网群典型特征及运行模式

将地理位置毗邻且存在较紧密电气连接的 3 个或 3 个以上微电网组合成微电网群进行联合协调控制,因此微电网群可通过一个公共连接点(PCC)或是多个 PCC 接入电网,各微电网可单独运行也可接受群控群调。多微电网集群典型结构如图 1 所示,可见各微电网间可以是并联关系,也可以是串联关系。

多微电网集群控制的分层结构及通信示意图如图 2 所示,其中 GOOSE 以其高速点对点通信上传遥信变量和下发遥控指令;SV 为 IEC61850 的采样值服务,既可以让多个设备共享某部分采样值,又可以让某个设备单独获得这部分采样值;制造报文规范(MMS)服务采用双边应用关联传送服务请求和响应,其是基于 client/server 模式的可靠通信方式,因此用作能量管理系统和控制器之间的通信。分层结构中依次包含单元层、微电网层、微电网群层。其中单元层完成电压和频率的一次调整,即就地控制;微电网层包含微电网能量管理系统和微电网控制系统,实现预测、优化决策、模式转换、下发指令等功能;

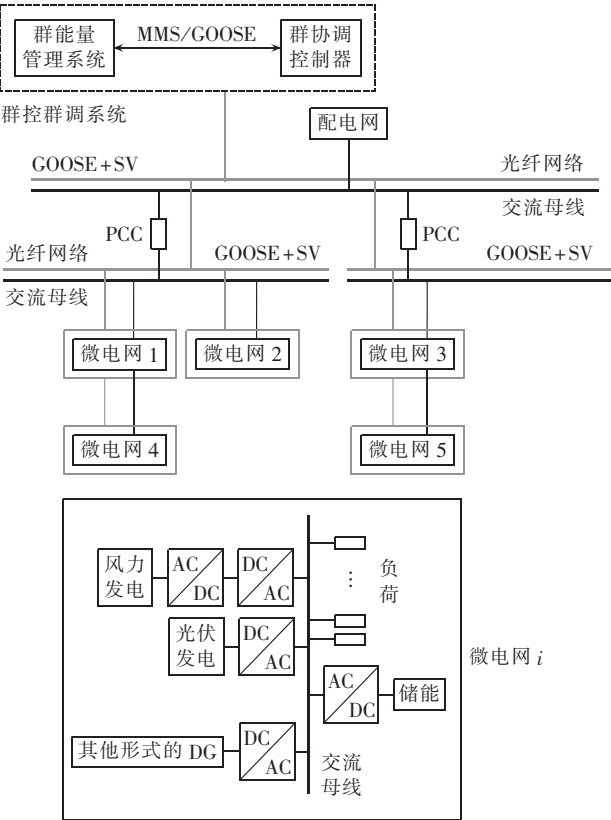


图 1 微电网群典型结构

Fig.1 Typical structure of microgrid cluster

微电网群层包含群能量管理系统和群控制系统,实现接受群级指令和协调内部各单元的功能。

微电网群中各微电网既能运行在并网模式接受群控或非群控,又能运行在离网模式接受群控或非群控,这就决定了微电网群运行模式的多样性。因此微电网群应包含以下 4 种基本的运行模式:模式 A,群并网模式;模式 B,群离网模式;模式 C,独立并

网模式;模式 D,网独模式。模式 A 下各微电网并网运行并统一接受群调/群控;模式 B 下各微电网离网运行,但依旧存在共同运行目标,接受群调/群控;模式 C 下各微电网独立并网,没有共同运行目标,只接受各自网调/网控;模式 D 下各微电网孤岛运行,只接受群调/群控以保证各自稳定运行。

2 微电网群功率波动熵值模型

2.1 微电网群功率优化控制目标

在微电网的运行控制中,应当减小微电网与大电网间交换功率大小和波动性以使其友好并网。微电网相互之间的能量互济,可使多个微电网通过区域自治消纳,实现多个微电网内部供需动态平衡,提高能源利用效率,减小与主电网的能量交互及功率的波动。因此本文以各微电网通过能量互济后微电网群内不平衡功率绝对值的平均功率作为运行控制目标,以各微电网间交换功率作为外层变量。定义时间窗口为 T ,区间内包含 N 个采样点,则在时间窗口 T 内的控制目标 F 如式(1)所示。

$$\min F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (P_{\text{unb_mg_}j}(i) - \Delta P_{\text{mg_}j}(i))^2}}{N} \tag{1}$$

其中, M 为微电网的个数; $P_{\text{unb_mg_}j}(i)$ 为第 j 个微电网在时段 i 与其他微电网互济之前的不平衡功率,如式(2)所示,为当前时段微电网内供需间的差值,其值为正表示网内有盈余功率,表征其具备向其他微电网馈电的能力,为负表示网内有缺额功率,表征其需从其他微电网处受电; $\Delta P_{\text{mg_}j}(i)$ 为第 j 个微电网在时段 i 与其他微电网的交换功率,为正表示向其他微电网馈电,为负表示接受其他微电网馈电。当与其

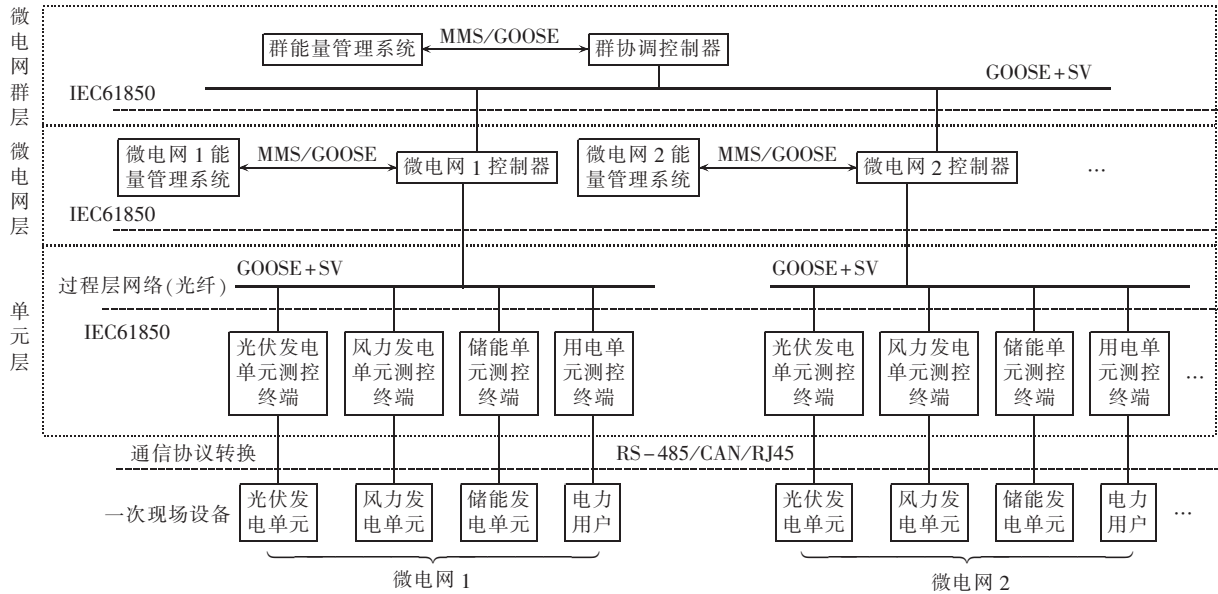


图 2 微电网群分层结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of hierarchical structure of microgrid cluster

他微电网交换的功率 $\Delta P_{\text{mg}_j}(i)$ 能够平抑该网内不平衡功率 $P_{\text{unb_mg}_j}(i)$ 时,两者相等;若不能完全平抑,其剩余不平衡功率将由主网根据微电网群运行模式通过群 PCC 或网 PCC 进行平抑。

$$P_{\text{unb_mg}_j}(i) = P_{\text{DG}}(i) - P_{\text{load}}(i) \quad (2)$$

其中, $P_{\text{DG}}(i)$ 、 $P_{\text{load}}(i)$ 分别为第 j 个微电网内分布式发电功率、负荷功率的预测值。控制变量 $\Delta P_{\text{mg}_j}(i)$ 与时段 i ; 第 j 个微电网内的储能剩余电量水平直接关联,此外,还与此时段网内间歇性微源的发电水平、负荷投切情况相关。本文为了提高间歇性电源发电率及保证负荷的供电可靠性,认为间歇性电源在任意时刻均按照最大功率发电,且不采取切负荷的控制方法,因此只以储能充放电功率作为决策变量。因此,以各微电网内储能的充放电功率作为决策变量,优化控制目标可改写为:

$\min F =$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [P_{\text{unb_mg}_j}(i) - f(P_{\text{ESS_mg}_1}(i), \dots, P_{\text{ESS_mg}_j}(i))]^2}{N}} \quad (3)$$

其中, $P_{\text{ESS_mg}_j}(i)$ 为第 j 个微电网内储能在时段 i 的充放电功率; f 为以各储能充放电功率为决策变量的显性表达式,其具体形式如式(4)所示。

$$f = \sum_{l=1, l \neq j}^M (P_{\text{wind_mg}_l}(i) + P_{\text{pv_mg}_l}(i) + P_{\text{ESS_mg}_l}(i)) + P_{\text{ESS_mg}_j}(i) \quad (4)$$

其中, $P_{\text{wind_mg}_l}$ 、 $P_{\text{pv_mg}_l}$ 分别为除第 j 个微电网外其他微电网所馈送的风电功率和光伏功率,这种馈送只会在第 l 个微电网内 $P_{\text{wind_mg}_l} + P_{\text{pv_mg}_l} > P_{\text{load_mg}_l}$ 时才可能发生,如果 $P_{\text{wind_mg}_l} + P_{\text{pv_mg}_l} \leq P_{\text{load_mg}_l}$ 则有 $P_{\text{wind_mg}_l} = P_{\text{pv_mg}_l} = 0$; $P_{\text{ESS_mg}_l}$ 为除第 j 个微电网以外其他微电网储能针对第 j 个微电网的充放电功率,其值为正表示放电,为负表示充电。

2.2 微电网群功率波动熵值模型

在上述滚动优化中,每个窗口内的优化均独立于其他窗口的优化结果,在实际运行中,上一窗口优化下的储能充放电序列将直接影响下一窗口内储能的充放电能力,制约下一窗口的优化效果,因此在整个时域内储能能在各窗口的优化结果最后可能差异较大,PCC 处整体功率波动控制结果不理想。为了使总时域内各窗口优化结果差异较小,引入熵值以对系统混乱和无序状态进行度量,当系统处于唯一状态时,其有序程度最高,相应熵值最小为 0;当系统处于多种状态且等概率出现时,其有序程度最低,对应熵值最大^[15-16]。将上述求得各窗口下的 F 值按大小均分成 23 个区间 $[U_1, U_2)$ 、 $[U_2, U_3)$ 、 $\dots$ 、 $[U_{23}, U_{24}]$, 则将本文熵值模型定义如下:

$$\min H = - \sum_{k=1}^{D-1} (F_{k,\max} - F_{k,\min}) \mu_k \ln \mu_k \quad (5)$$

其中, D 为总区间数; $F_{k,\max}$ 、 $F_{k,\min}$ 分别为区间 $[U_k, U_{k+1})$ 内 F 的最大值、最小值; μ_k 为属于区间 $[U_k, U_{k+1})$ 内出现 F 值的时间点个数占总时间点的比例。这里引入了 F 的峰谷差值作为衡量 F 波动性大小的惩罚系数,即当峰谷差值较大时,即使 F 的有序性较强,熵值依然会较大,只有当峰谷差值较小且 F 有序性较强时,熵值才会最小。

整个优化过程分为各窗口内 F 值的优化和 24 个区间数内的 H 值优化,设时间窗口总数为 C ,则整个优化流程如图 3 所示,图中 L 为迭代次数。

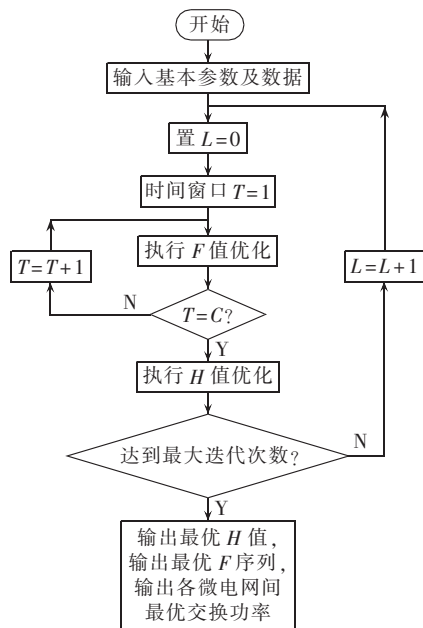


图 3 优化计算流程图

Fig.3 Flowchart of optimization calculation

根据储能系统荷电状态(SOC)限值及 2 倍额定充放电功率作为当前充放电功率的限值,即优化变量的约束条件如式(6)~(8)所示。

$$P_{\text{ess,maxch}}(i) = \frac{\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}(i)(1-\delta)}{\Delta t r_c} \quad (6)$$

$$P_{\text{ess,maxdic}}(i) = \frac{\text{SOC}(i)(1-\delta) - \text{SOC}_{\min}}{\Delta t} r_D$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ess,ch}}(i) \leq 2P_{\text{rate}} & P_{\text{ess,maxch}}(i) > 2P_{\text{rate}} \\ 0 \leq P_{\text{ess,ch}}(i) \leq P_{\text{ess,maxch}}(i) & P_{\text{ess,maxch}}(i) \leq 2P_{\text{rate}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ess,dic}}(i) \leq 2P_{\text{rate}} & P_{\text{ess,maxdic}}(i) > 2P_{\text{rate}} \\ 0 \leq P_{\text{ess,dic}}(i) \leq P_{\text{ess,maxdic}}(i) & P_{\text{ess,maxdic}}(i) \leq 2P_{\text{rate}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P_{\text{ess,maxch}}(i)$ 、 $P_{\text{ess,maxdic}}(i)$ 分别为储能根据当前时段 i 的 SOC 值及 SOC 限值($\text{SOC}_{\max}$ 、 $\text{SOC}_{\min}$)所确定的时段 i 的最大充、放电功率; r_c 、 r_D 分别为储能充、放电效率; δ 为储能自放电率; Δt 为采样时间间隔; 式(7)、(8)分别为储能当前充、放电功率的具体约束,在约束中将储能额定充放电功率 P_{rate} 考虑其中,认为

储能最大允许工作在2倍的额定充放电功率下。

式(7)、(8)通过 $2P_{\text{rate}}$ 与 $P_{\text{ess,maxch}}(i)$ 、 $P_{\text{ess,maxdic}}(i)$ 的对比实际上缩小了优化变量的约束范围,并通过时段 i 充、放电的解耦约束进一步缩小了优化变量的搜索解空间,减小了优化计算量。

2.3 优化模型求解算法

本文为了在较快收敛速度下获得全局最优解,将采用一种 QPSO 算法,该算法在粒子群优化(PSO)算法^[17]的基础上,通过编码方式的改进,能够改善其早熟收敛、全局寻优能力较差、收敛速度较慢等缺陷。QPSO 算法的核心是采用量子位对粒子的当前位置进行编码,用量子旋转门实现对粒子最优位置的搜索,用量子非门实现粒子位置的变异以避免早熟收敛。其基本计算步骤如下(对于量子算法引入智能算法中的研究,目前国内外已有相关研究^[18],因此本文对算法的数学机理不再阐述):

a. 产生初始种群,采用量子位的概率幅作为粒子当前位置的编码;

b. 将每个粒子占据的单位空间 $I=[-1,1]^n$ 映射到优化问题的解空间以计算粒子当前位置的优劣性;

c. 通过量子旋转门完成 PSO 算法中粒子位置的更新,其中通过粒子量子位概率幅完成 PSO 算法中粒子位置的更新,通过量子旋转门转角更新完成粒子移动速度的更新;

d. 通过量子非门引入变异算子以增加种群多样性,避免早熟收敛。

3 微电网群功率分层控制

图2对微电网群的分层结构进行了简单的阐述,本文在此基础上进行功率控制,基本流程图如图4所示。具体步骤如下。

a. 判断当前微电网群运行模式是否与群调校验一致。

b. 能量管理系统根据第2节中的微电网群 PCC 处的功率波动熵值模型计算 $P_{\text{d_mg1}}$ 、 $P_{\text{d_mg2}}$ 、 $P_{\text{d_mg3}}$ 并下发给群控系统,其中 $P_{\text{d_mg1}}$ 、 $P_{\text{d_mg2}}$ 、 $P_{\text{d_mg3}}$ 分别为群调下发给微电网1、微电网2、微电网3的功率指令。

c. 群控系统对功率进行一次校验:对各微电网的实际输出能力进行校验,当 $P_{\text{d_mgi}} \leq 0 (i=1,2,3)$ 时,如果 $P_{\text{disvai}} - P_{\text{disreal}} \geq |P_{\text{d_mgi}}|$,那么 $P_i^* = P_{\text{d_mgi}}$; 如果 $0 \leq P_{\text{disvai}} - P_{\text{disreal}} < |P_{\text{d_mgi}}|$,那么 $P_i^* = P_{\text{disvai}} - P_{\text{disreal}}$; 如果 $P_{\text{disvai}} - P_{\text{disreal}} < 0$,那么 $P_i^* = 0$ 。其中, P_{disvai} 、 P_{disreal} 分别为微电网可发电功率、实际发电功率; P_1^* 、 P_2^* 、 P_3^* 为功率一次修正后的值。

d. 群控系统对功率进行二次校验:对各微电网实际输入能力进行校验,当 $P_{\text{d_mgi}} > 0 (i=1,2,3)$

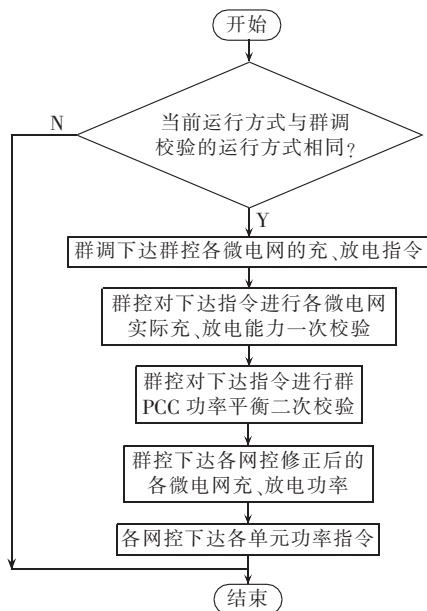


图4 功率分层控制流程图

Fig.4 Flowchart of hierarchical power control

时,如果 $P_{\text{chvai}} - P_{\text{chreal}} \geq |P_{\text{d_mgi}}|$,那么 $P_i^* = P_{\text{d_mgi}}$; 如果 $0 \leq P_{\text{chvai}} - P_{\text{chreal}} < |P_{\text{d_mgi}}|$,那么 $P_i^* = P_{\text{chvai}} - P_{\text{chreal}}$; 如果 $P_{\text{chvai}} - P_{\text{chreal}} < 0$,则 $P_i^* = 0$ 。其中, P_{chvai} 、 P_{chreal} 分别为微电网可充电功率、实际充电功率; P_{disvai} 、 P_{chvai} 已将储能功率正、负调节能力包含在内。

e. 群控下达各微电网修正后的充、放电功率,以1个微电网从其他2个微电网接收功率的情形($P_1^* < 0$ 、 $P_2^* < 0$ 、 $P_3^* > 0$)为例说明:若 $P_1^* + P_2^* + P_3^* \geq 0$,则 $P_{\text{order1}} = P_1^*$ 、 $P_{\text{order2}} = P_2^*$ 、 $P_{\text{order3}} = -(P_{\text{order1}} + P_{\text{order2}})$,下发指令 P_{order1} 、 P_{order2} 、 P_{order3} ; 如果 $P_1^* + P_2^* + P_3^* < 0$,则 $P_{\text{order1}} = -P_1^* / [(P_2^* + P_3^*)P_3^*]$ 、 $P_{\text{order2}} = -P_2^* / [(P_1^* + P_2^*)P_3^*]$ 、 $P_{\text{order3}} = P_3^*$,下发指令 P_{order1} 、 P_{order2} 、 P_{order3} 。其中, P_{order1} 、 P_{order2} 、 P_{order3} 为二次修正后的功率指令值。同理可对1个微电网向其他2个微电网馈电的情形进行判断验证。

f. 网控将指令下发给各单元。

4 算例仿真计算

仿真算例如图5所示,算例包含3个微电网,本文采用各微电网并联的拓扑结构,3个微电网通过一个群PCC接入配电网。当PCC₁、PCC₂、PCC₃均闭合则3个微电网并列运行,断开则孤岛运行。

取1d为总计算时间长度,时间窗口时长5min,采样间隔取1min,则每一时间窗口内包含15个优化变量,记微电网1内储能充放电功率为 $P_{\text{mg1_ba}}$ 、微电网2内储能充放电功率为 $P_{\text{mg2_ba}}$ 、微电网3内储能充放电功率为 $P_{\text{mg3_ba}}$,优化变量序列可表示为 $[P_{\text{mg1_ba}}(1), P_{\text{mg1_ba}}(2), \dots, P_{\text{mg1_ba}}(5), P_{\text{mg2_ba}}(1), P_{\text{mg2_ba}}(2), \dots, P_{\text{mg2_ba}}(5), P_{\text{mg3_ba}}(1), P_{\text{mg3_ba}}(2), \dots, P_{\text{mg3_ba}}(5)]^T$,最大迭代次数为50次,子微电网1、2、3内配置同类型储能, r_c 、 r_d 分

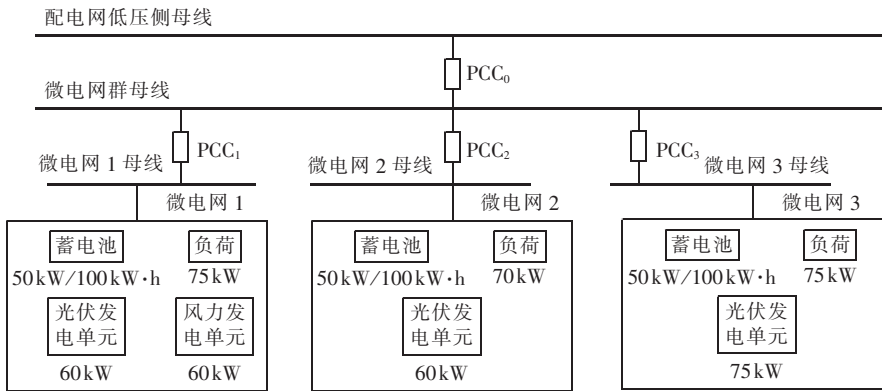


图 5 微电网群结构与容量配置

Fig.5 Structure and capacity configuration of microgrid cluster

别为 0.95、0.9, SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为 0.9、0.2, 自放电率 δ 取 0.02。定义如下 3 种方案进行对比。

方案 a: 3 个微电网独立并网运行, 不接受群控, 不存在功率互济。

方案 b: 3 个微电网接受群控, 存在功率互济, 且进行 F 值优化, 但不进行熵值 H 优化。

方案 c: 3 个微电网接受群控, 存在功率互济, 且进行 F 值优化和熵值 H 优化。

3 个微电网中的风电、光伏实际发电功率及负荷曲线如图 6 所示。

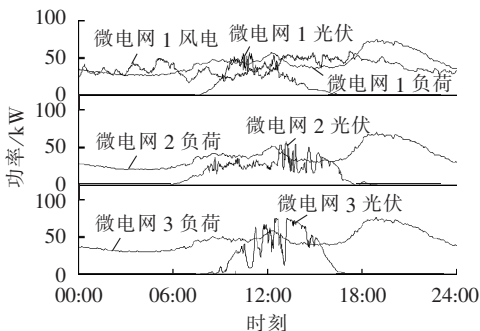


图 6 各微电网中风电、光伏发电功率及负荷功率曲线

Fig.6 Curve of wind power, photovoltaic power and load power of microgrids

在方案 a 中, 由于不存在群 PCC, 只考察各网 PCC 在本算例配置下与配电网的交换功率以及储能实际充放电曲线; 在方案 b、c 中, 群调将依据群内发电的预测, 并运用第 2 节中 F 值或 H 值优化模型及算法计算得到各微电网间计划交换功率并下发给群控, 群控系统基于实际发电数据及各储能当前状态对计划功率进行一、二次校验, 得到修正后的功率值下发给各网控。为了简化计算, 本文所用到的预测值为在实际发电数据上以一定的预测误差带乘以随机系数得到。

方案 a 下各微电网与配电网的交换功率如图 7 所示, 各储能充放电曲线如图 8 所示。由图 7、8 可知, 由于储能最大充放电功率及容量的限制, 各微电

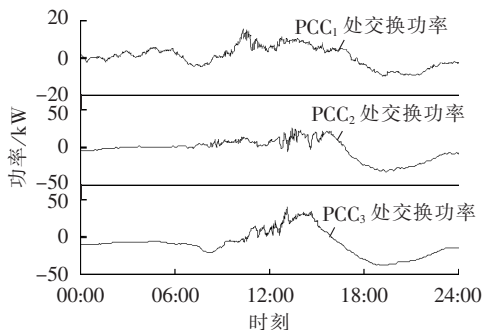


图 7 各微电网与配电网的交换功率曲线

Fig.7 Curve of exchange power between microgrids and distribution network

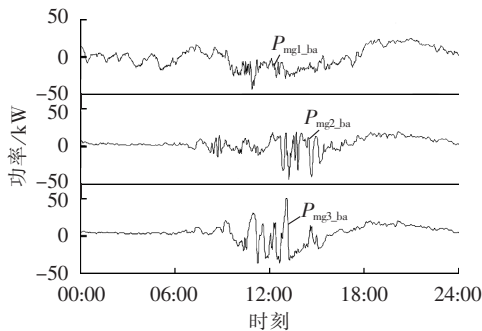


图 8 各微电网中储能充放电曲线

Fig.8 Curve of energy storage charging/discharging power of microgrids

网中由发电单元的间歇性造成的不平衡功率将由配电网完全承担, 且波动较大。

方案 b、c 下各储能充放电曲线如图 9 所示, 各微电网间的交换功率如图 10 所示, 群 PCC 处的交换功率如图 11 所示, 2 种方案下的熵值分别为 1.83 和 0.68。

由图 9 可知, 方案 c 在 10:00—15:00 时间段较方案 b 有更多的电量存储, 使其在 17:00—24:00 时间段群内发电量小于用电量时较方案 b 能够平滑放电, 稳定地支撑群内负荷需求。

由图 10、11 可知, 由于方案 c 中储能合理充放电, 使得在各储能联合作用下, 各微电网通过相互

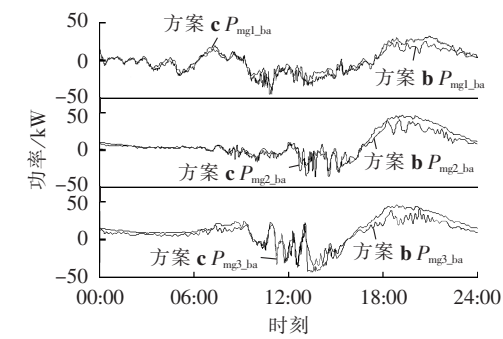


图 9 方案 b、c 下各微电网中储能充放电曲线
Fig.9 Curve of charging/discharging power energy storage of microgrids in Case b and c

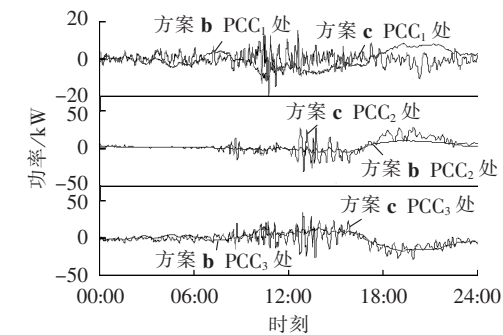


图 10 方案 b、c 下各微电网的交换功率
Fig.10 Exchange power of microgrids in Case b and c

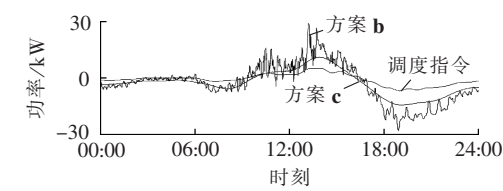


图 11 微电网群 PCC 处的交换功率
Fig.11 Exchange power at PCC of microgrid cluster

间的功率互济,平抑了各微电网内不平衡功率的波动,具体表现为方案 c 下的各微电网间交换功率较方案 b 下波动性更大,这是因为方案 c 对群 PCC 处的交换功率波动性进行了熵值优化,在熵值优化中同时对交换功率波动性和峰谷差进行了优化,如式(4)所示,因此方案 c 下微电网群内不平衡功率及波动性更多是通过群内各微电网间的功率互济完成了就地消纳。所以群 PCC 与配电网的交换功率,方案 c 较方案 b 要平滑很多,方案 c 跟踪调度指令效果更佳。

方案 a 下各网 PCC 与配电网交换功率的 F 值叠加曲线,以及方案 b、c 下群 PCC 处的交换功率 F 值曲线如图 12 所示。在图 12 的基础上,3 种方案下 F 值的波动性 $D_F = |F(i) - F(i-1)|$ 如图 13 所示。

由图 12、13 可知,方案 b 由于各微电网间存在功率互济,能够平衡一定量的供需功率,因此较方案 a,其 F 值整体大致减小一半,波动性也减小了一半。而在方案 c 中,由于进行了熵值优化,使得储能充放电合理,提高了微电网群整体平抑能力,大幅降低了

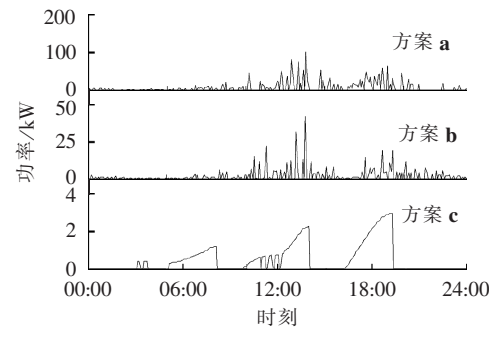


图 12 方案 a 下各网 PCC 总交换功率曲线和方案 b、c 下微电网群 PCC 交换功率曲线
Fig.12 Curves of total exchange power at PCC of microgrids in Case a and exchange power at PCC of microgrid cluster in Case b and c

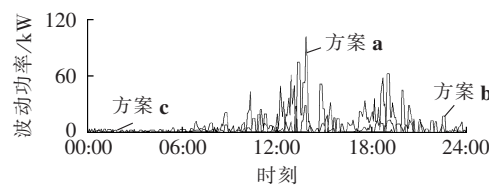


图 13 各方案下的波动功率
Fig.13 Fluctuation power of cases

功率波动程度,其 F 值及其波动性远小于方案 b。另外在方案 c 下若在寻优过程中未采用 QPSO 算法,而是采用普通的 PSO 算法,两者的寻优轨迹对比如图 14 所示。由图 14 可知,由于 QPSO 算法在 PSO 算法基础上对编码方式进行了改进,在寻优结果上其寻得的最小熵值为 0.68,小于 PSO 算法寻得的 0.72;在收敛性能上,QPSO 算法大概迭代 50 次收敛,而 PSO 算法在接近 150 次迭代时才收敛。因此 QPSO 算法的全局寻优精度和算法收敛速度均优于 PSO 算法。

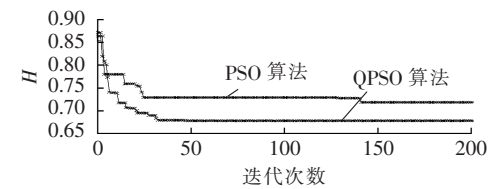


图 14 QPSO 算法和 PSO 算法的寻优结果
Fig.14 Optimization results of QPSO algorithm and PSO algorithm

由于本文未考虑电池储能寿命的优化,从图 8、图 9 可知,3 种方案下电池储能充放电功率波动性较大,将不利于电池的寿命。目前,可通过配置混合储能^[19],由功率型储能承担波动性大的分量,由电池储能承担波动小的分量,将有利于延长电池储能的寿命,众多文献对此展开了研究,本文由于侧重点的原因,不再赘述。

5 结论

本文在微电网研究基础上,分析阐述了微电网

群的典型物理结构,结构中各微电网通过 1 个或多个群 PCC 接入配电网,各微电网间既可能为并行关系,也可能包含串行关系,其相互之间存在简单的电气及通信关联;在控制及调度结构上,采用了分层结构,从上到下依次为微电网群层、子微电网层、单元层;基于微电网群拓扑及分层结构,提出了一种微电网群与主网交换功率的优化控制方法,建立了衡量交换功率波动性的熵值优化函数,采用 QPSO 算法对目标函数进行求解,最后采用三微电网组成的微电网群算例进行计算验证,结果表明:

a. 微电网群较单一微电网能够充分利用各自网内的发电资源,通过相互间合理的功率互济,能有效减少与主网的交换功率,进一步实现功率就地平衡;

b. 采用所提优化控制方法后微电网群较未采用所提方法的情景,能够进一步减少与主网交换功率的波动性,避免了因功率波动可能引起的稳定性问题。

参考文献:

- [1] KUMAR Y V P, BHIMASINGU R. Renewable energy based microgrid system sizing and energy management for green buildings[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2015, 3(1): 1-13.
- [2] HATZIGARY N, ASAND H, IRAVANI, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [3] YUNWEI L I, NEJABATKHAH F. Overview of control, integration and energy management of microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2014, 2(3): 212-222.
- [4] 张晓雪, 牛焕娜, 赵静翔, 等. 考虑微电网供电潜力的配电网孤岛划分[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 51-58.
ZHANG Xiaoxue, LIU Huanna, ZHAO Jingxiang, et al. Distribution network island partition considering potential power-supply of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 51-58.
- [5] 王成山, 王守相. 分布式发电功能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distribution generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [6] 徐意婷, 艾芊. 含微电网的主动配电网协调优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 18-26.
XU Yiting, AI Qian. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 18-26.
- [7] KARGARIAN A, FALAHATI B, YONG F, et al. Multiobjective optimal power flow algorithm to enhance multi-microgrids performance incorporating IPFC[C]//Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012: 22-26.
- [8] MANJARRES P, MALIK O. Frequency regulation by fuzzy and binary control in a hybrid islanded microgrid[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2015, 3(3): 429-439.
- [9] MAKNOUNINEJAD A, QU Z, ENSLIN J, et al. Clustering and cooperative control of distributed generators for maintaining microgrid unified voltage profile and complex power control[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [10] SUJIL A, AGARWAL S K, KUMAR R. Centralized multi-agent implementation for securing critical loads in PV based microgrid[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2014, 2(1): 77-86.
- [11] MADUREIRA A G, PECAS LOPES J A. Coordinated voltage support in distribution networks with distributed generation and microgrids[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(4): 439-454.
- [12] SCHWAEGERL C, LIANG T, MANCARELLA P, et al. A multi-objective optimization approach for assessment of technical, commercial and environmental performance of microgrids[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2011, 21(2): 1269-1288.
- [13] 熊雄. 微电网混合协调控制策略及有功功率优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
XIONG Xiong. Research of hybrid coordinate control and active power optimal strategy for microgrid cluster[D]. Beijing: China Agriculture University, 2017.
- [14] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. An identification model self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6.
- [15] 张利彪, 周春光, 马铭, 等. 基于粒子群算法求解的多目标优化问题[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1286-1291.
ZHANG Libiao, ZHOU Chunguang, MA Ming, et al. Solutions of multi-object optimization problems based on particle swarm optimization[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(7): 1286-1291.
- [16] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微电网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 107-115.
ZHI Na, XIAO Xi, TIAN Peigen, et al. Research and proposed of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 107-115.
- [17] 裴玮, 杜妍, 李洪涛, 等. 应对微电网群大规模接入的互联和互动新方案及关键技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3193-3203.
PEI Wei, DU Yan, LI Hongtao, et al. Novel solution key technology of interconnection and interaction for large scale microgrid cluster integration[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3193-3203.
- [18] 候云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.
HOU Yunhe, LU Lijuan, XIONG Xingen, et al. Enhanced particles swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100.

[19] ZHAO H,QIUWEI W U,WANG C,et al. Fuzzy logic based coordinated control of battery energy storage system and dispatchable distributed generation for microgrid[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy,2015,3(3):422-428.

作者简介:

熊 雄(1988—),男,湖北恩施人,博士研究生,研究方



熊 雄

向为微电网协调控制技术;

王江波(1978—),男,浙江台州人,副教授,博士,通信作者,研究方向为微电网技术(E-mail:56537969@qq.com);

井天军(1980—),男,北京人,副教授,博士,研究方向为微电网技术。

Power optimization control of microgrid cluster

XIONG Xiong,WANG Jiangbo,JING Tianjun,YANG Rengang,YE Lin

(College of Information and Electrical Engineering,China Agriculture University,Beijing 100083,China)

Abstract: Due to the increased penetration of intermittent power generations(distributed wind power and photovoltaic power) in medium and low voltage distribution network,multiple microgrids may coexist in a regional distribution system,and therefore the microgrid cluster technologies of energy mutual-aid and coordination control have attracted wide attention. Based on the research of microgrid,typical characteristics and topology structure of microgrid cluster are analyzed. With power fluctuations of microgrid cluster as research objects,the dynamic dispatch model of power fluctuation entropy of microgrid cluster is established,which is solved by QPSO(Quantum Particle Swarm Optimization) algorithm to realize the optimization control. Simulative results verify the correctness and effectiveness of the proposed power optimization control method of microgrid cluster.

Key words: microgrid cluster; power fluctuation; entropy model; QPSO algorithm; power control; optimization