

孤岛微电网分布式P-V协调控制策略

苏晨, 吴在军, 窦晓波

(东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096)

摘要:为提升有功功率分配精度和降低线路损耗,研究了一种孤岛微电网分布式有功-电压(P-V)协调控制策略。重点提出了考虑线损系数及节点电压优化量的有功分配因子设计方法,并研究了基于有功分配因子一致原则的功率分配方法。采用分布式稀疏通信网络进行信息交互,利用一致性算法得到二级控制所需的有功分配因子平均估计值和系统平均电压估计值,产生综合电压优化量完成下垂控制优化,实现孤岛微电网分布式P-V协调控制。该策略可有效兼顾线路损耗降低以及有功功率分配精度提升,控制各节点电压在合理范围内,并调节系统平均电压至额定值。最后通过MATLAB/Simulink仿真验证了所提控制策略的有效性。

关键词:孤岛微电网;P-V/Q-f下垂控制;分布式P-V协调控制策略;有功分配因子;一致性算法

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102034

0 引言

由分布式电源(DG)、储能设备、负载以及电力电子控制装置等构成的微电网作为一种新型电网形态,是解决DG大规模并网问题的有效可靠方式之一,具有并网和孤岛2种运行模式^[1-2]。微电网中多通过电力电子装置实现DG接入,基于电力电子装置实现的微电网控制策略对系统稳定和优化运行具有重要作用。分层控制是目前孤岛微电网控制策略中应用较为广泛的控制架构^[3],下层一级控制通常采用下垂控制,快速实现系统频率和电压稳定,完成各DG间自主分配功率。但是下垂控制本质上是一种频率和电压的有差控制,且控制精度易受系统线路阻抗的影响,因此有必要引入上层二级控制甚至三级控制,实现微电网乃至微电网群系统级的优化^[3-4]。

对于微电网传统二级控制,相关策略主要包括集中式和分散式2类。集中式控制^[3-4]利用中心控制器实现海量信息采集和信息处理,下发指令至所有DG的一级控制器完成系统优化。集中式策略控制精度较高,但是过于依赖中心控制器,且易发生单点故障,因此系统可靠性和灵活性较低。分散式控制仅利用本地信息控制,可靠性较高,但是由于本地信息的局限性,控制精度较低^[5-6]。为了弥补集中式控制和分散式控制的缺点,分布式控制在电力系统中的应用已成为研究热点,采用分布式稀疏通信网络观测全局状态,控制精度较高,并且不存在中心节点,系统可靠性及可扩展性较高^[7-12]。

传统下垂控制主要采用针对感性线路阻抗的

P-f/Q-V下垂控制,由于频率是全局变量,因此有功功率可精确分配,无功功率的分配精度则易受线路阻抗的影响。文献[8]提出了基于有限时间一致性协议的分布式控制,能够在有限时间内恢复微电网电压和频率。为了进一步实现无功功率优化分配,文献[9-10]提出了分布式二级控制,采用通信网络与部分节点进行信息交互,减少电压及频率偏差,并有效提高了无功功率分配精度。文献[11]提出了一种分布式优化控制,基于等微增率准则实现功率分配,降低系统运行成本。文献[12]考虑系统延时因素,提出了非理想环境下的分布式优化控制策略。

由于Q-V下垂控制特性,提高无功功率分配精度易扩大各节点间的电压偏差,无功功率精确分配目标和电压控制目标存在一定程度的冲突。文献[8-10]实现了精确化无功功率分配,但是仅调节了系统整体平均电压至额定值,尚未考虑节点间电压偏差问题。文献[13]提出了分布式离散双层控制策略,提高了无功功率分配精度,同时降低了整体节点电压偏差。文献[14]针对Q-V控制下的精确无功功率分配和电压控制问题,研究了一种新型分布式控制器实现以上冲突目标的简易协调。

通常微电网电压等级较低,线路阻抗主要呈阻性^[15-17],采用P-V/Q-f下垂控制可以更好地解耦有功功率和无功功率的控制,文献[18]研究了针对阻性微电网的分布式控制策略,实现有功功率的精确比例分配。对于P-V下垂控制而言,提高有功功率分配精度会增大各节点间电压偏差,进而导致系统线路损耗增大,降低了整体能源有效利用率,因此有功功率精确分配目标和线路损耗降低目标存在一定冲突。

本文在现有研究的基础上,提出了一种孤岛微电网分布式P-V协调控制策略。为了协调提高有功功率分配精度和降低线路损耗2个冲突目标,并全

收稿日期:2020-06-21;修回日期:2020-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977034)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977034)

面考虑各节点电压状态,本文结合线损系数及节点电压优化量设计了有功分配因子。基于有功分配因子一致原则提出了功率分配方法,实现在考虑线路损耗的情况下,提高有功功率分配精度,并控制各节点电压在合理范围内。此外将系统平均电压调节至额定值,实现系统层面的电压优化。该策略基于分布式稀疏通信网络与少量节点交互所需信息,利用一致性算法获取有功分配因子平均估计值和系统平均电压估计值,用于二级 $P-V$ 协调控制,不存在中心控制器,可靠性较高。最后通过仿真分析,验证了所提控制策略的有效性。

1 下垂控制及二级优化控制原理

低压微电网中线路阻抗主要呈阻性^[15-17],因此本文采用基于 $P-V/Q-f$ 特性的下垂控制。则微电网中 DG_i 的下垂控制模型为:

$$E_i^{\text{ref}} = E_{\max} - K_{P_i} P_i, K_{P_i} = (E_{\max} - E_{\min}) / P_{\max i} \quad (1)$$

$$f_i^{\text{ref}} = f_N + K_{Q_i} Q_i, K_{Q_i} = (f_{\max} - f_N) / Q_{\max i} \quad (2)$$

其中, E_i^{ref} 、 f_i^{ref} 分别为 $P-V$ 、 $Q-f$ 下垂控制所得电压参考值和频率参考值; K_{P_i} 、 K_{Q_i} 分别为 $P-V$ 、 $Q-f$ 下垂控制的下垂系数; P_i 、 Q_i 分别为 DG_i 输出的有功功率和无功功率; $P_{\max i}$ 、 $Q_{\max i}$ 分别为 DG_i 最大允许输出有功功率、无功功率; f_N 为频率额定值; E_{\max} 、 E_{\min} 、 f_{\max} 分别为最大允许电压、最小允许电压、最大允许频率。

图1为微电网中 n 台逆变器并联等效电路图。图中, $E_i \angle \delta_i$ 为 DG_i 逆变器输出端电压; $Z_i \angle \theta_i = R_i + jX_i$ 为 DG_i 传输线路的阻抗; $U_0 \angle 0^\circ$ 为母线电压。

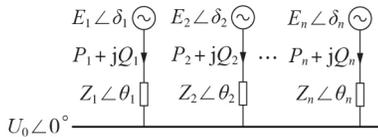


图1 多台逆变器并联等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of multiple inverters in parallel

当各线路阻抗相等时,逆变器输出端电压 $E_1 = E_2 = \dots = E_n$,根据式(1)可得各 DG 输出有功功率按有功功率容量比例(即下垂系数反比)分配:

$$K_{P_1} P_1 = K_{P_2} P_2 = \dots = K_{P_i} P_i = \dots = K_{P_n} P_n \quad (3)$$

当线路阻抗不相等时,忽略线路电感上的压降,则线路阻抗上的电压降落 ΔU_i 可近似为:

$$\Delta U_i = P_i R_i / E_i \quad (4)$$

系统中逆变器输出电压 E_i 满足 $|E_i - E_N| < 5\% E_N$ (E_N 为电压额定值),因此认为 $E_i \approx E_N$ 。

根据式(1)和式(4)可得:

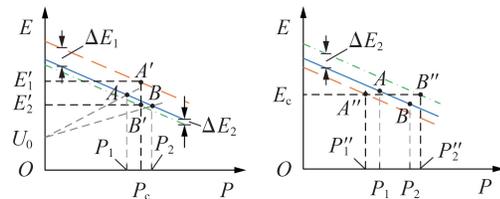
$$U_0 = E_i - \Delta U_i = (E_{\max} - K_{P_i} P_i) - P_i R_i / E_N = E_{\max} - (K_{P_i} + R_i / E_N) P_i \quad (5)$$

整理得到:

$$P_i = \frac{E_{\max} - U_0}{K_{P_i} + R_i / E_N} \quad (6)$$

由式(6)可知,有功功率的分配不仅与下垂系数有关,还受到线路电阻的影响。实际情况中线路阻抗往往不等,下垂控制难以精确按照容量比例分配有功功率,因此需要利用微电网二级控制优化下垂控制参数,以提高有功功率分配精度。

以2台相同容量的 DG 为例,其具有相同的初始下垂曲线,假设传输线路电阻 $R_1 > R_2$ 。图2为基于下垂控制的微电网二级优化控制原理,由式(4)可知,线路压降曲线体现在图2中为2条从 U_0 出发且斜率系数为 R_i / E_N 的曲线,与 $P-V$ 曲线分别相交于点 A 和点 B ,即 DG_1 和 DG_2 分别运行在点 A 和点 B 。



(a) 有功功率控制原理

(b) 电压控制原理

— DG_1 和 DG_2 的初始下垂曲线, — DG_1 调节后的下垂曲线
- - - DG_2 调节后的下垂曲线

图2 基于下垂控制的微电网二级优化控制原理

Fig.2 Principle of secondary optimal control for microgrid based on droop control

图2(a)为二级有功功率控制的原理,受线路电阻不同的影响,2台 DG 输出有功功率 P_1 和 P_2 相差较大,为了实现有功功率的高精度分配, DG_1 和 DG_2 的二级控制分别产生优化量 ΔE_1 和 ΔE_2 对初始下垂曲线进行调节,在调节后的下垂曲线作用下,系统达到新的稳定运行状态, DG_1 和 DG_2 分别运行于点 A' 和点 B' ,输出功率相等为 P_c 。调整后的输出端电压差 $|E'_1 - E'_2|$ 变大,不仅会增加系统的线路损耗,而且有可能导致节点电压 E'_i 越限。

图2(b)为二级电压控制的原理,进行电压控制后, DG_1 和 DG_2 分别运行在点 A'' 和点 B'' ,输出端电压均为 E_c ,但是输出有功功率之差增大。因此有功功率高精度分配目标和线路损耗降低目标存在一定冲突,为此本文提出分布式 $P-V$ 协调控制策略,协调有功功率高精度分配和低线路损耗需求,并进行系统和局部的电压优化。

2 分布式 $P-V$ 协调控制策略

2.1 分布式 $P-V$ 协调控制策略结构

针对孤岛微电网,本文所提分布式 $P-V$ 协调控制策略框图如图3所示,主要包括物理层、控制层和通信层3个部分。物理层指 DG 设备;控制层指 DG 的本地控制器,包含下垂控制和二级控制2个部分;

通信层由分布式稀疏通信网络构成,与节点存在通信互联的节点称为其邻居节点,网络中各节点地位均等,节点利用信息交互模块(ICM)与少量邻居节点进行信息交互,可靠性较高。

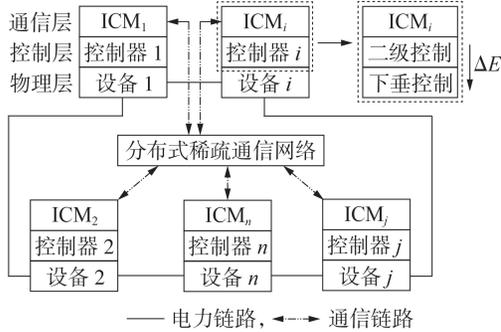


图3 微电网分布式P-V协调控制框图

Fig.3 Block diagram of distributed P-V coordinated control for microgrid

分布式P-V协调控制策略的信息交互模块及二级控制部分结构如图4所示。二级控制提出依据有功分配因子 F_i 一致原则的P-V协调控制策略,利用线损系数 η_i 优化有功分配因子,基于有功分配因子平均估计值 F_{avei} 实现有功分配因子一致,实现在考虑线路损耗的情况下,提高有功功率分配精度。电压控制包含局部节点电压控制和系统电压控制2个部分,节点电压控制利用节点电压优化量 ΔU_{si} 优化有功分配因子,控制节点电压在合理范围内;系统电压控制利用系统平均电压估计值 U_{avei} 调节系统平均电压至额定值。

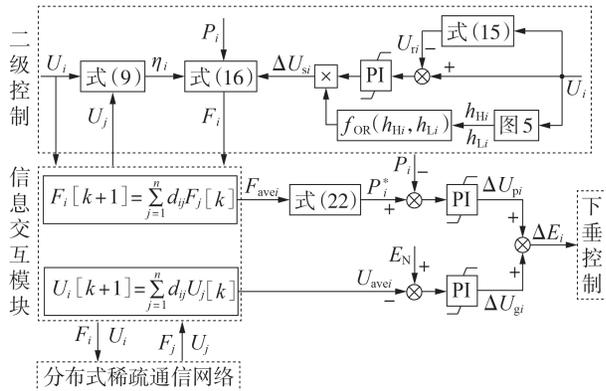


图4 微电网分布式P-V二级协调控制策略结构

Fig.4 Control structure of distributed P-V secondary coordinated control strategy for microgrid

策略的分布式实现利用信息交互模块基于分布式稀疏通信网络进行有功分配因子和节点电压信息的交互和处理,得到二级控制所需 F_{avei} 及 U_{avei} 。二级控制最终产生综合电压优化量 ΔE_i ,对下垂曲线进行优化,实现所提控制目标,如式(7)所示。

$$E_i = E_{\max} - K_{P_i} P_i + \Delta E_i \quad (7)$$

2.2 考虑线路损耗及节点电压的分布式P-V二级协调控制策略

2.2.1 控制原理

(1)考虑线路损耗。

由前述可知,提高有功功率分配精度会增加系统的线路损耗,为了在考虑系统线路损耗的情况下,削弱线路阻抗对有功功率分配的影响,本节利用 η_i 优化初始下垂系数,得到优化后的线损下垂系数:

$$K'_{P_i} = \eta_i K_{P_i} \quad (8)$$

$$\eta_i = 1 / (1 - \partial P_L / \partial P_i) \quad (9)$$

其中, P_L 为系统的线路损耗。

忽略对地支路,交流低压电力网络支路 ij 中通过的有功功率为:

$$P_{ij} = U_i^2 g'_{ij} - U_i U_j g'_{ij} \quad (10)$$

其中, U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压; $g'_{ij} = 1/R_{ij}$ 为支路 ij 的电导, R_{ij} 为支路 ij 的电阻。进而节点输出功率 P_{oi} 为:

$$P_{oi} = \sum_{j \in I, j \neq i} P_{ij} = \sum_{j \in I, j \neq i} g'_{ij} U_i (U_i - U_j) \quad (11)$$

其中, I 为与节点 i 直接相连的所有节点集合。因此系统线路损耗 P_L 可表示为:

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_{oi} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in I, j \neq i} P_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in I, j \neq i} g'_{ij} U_i (U_i - U_j) \quad (12)$$

由式(12)可知, P_L 与节点间的电压差 $U_i - U_j$ 有关, $U_i - U_j$ 越大, P_L 越大。对于DG节点有 $P_{oi} = P_i$,根据式(11)、(12)可得:

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = \frac{\sum_{j \in I, j \neq i} 2(U_i - U_j) g'_{ij}}{\sum_{j \in I, j \neq i} (2U_i - U_j) g'_{ij}} \quad (13)$$

若 $\partial P_L / \partial P_i > 0$,则表示随着DG输出功率变大,线路损耗会增加,由式(9)可知 $\eta_i > 1$,则 $K'_{P_i} > K_{P_i}$,即优化后线损下垂系数增大。

(2)考虑节点电压。

提高有功功率分配精度时,易扩大节点间电压偏差,可能会导致个别节点电压越限,考虑节点电压的P-V协调控制原理如下。

设节点电压上限和下限值分别为 U_H 、 U_L ,为避免调节过程中节点电压在限值处波动,采用电压滞环模块,其滞环环宽为 U_W 。电压滞环模块原理如图5所示,图中 h_{Hi} 、 h_{Li} 分别为节点 i 的电压上、下限滞环

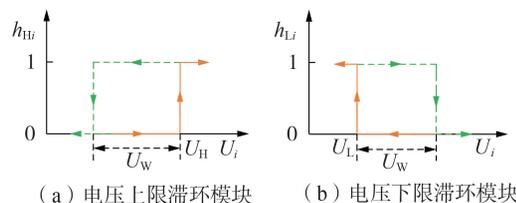


图5 节点电压滞环模块原理

Fig.5 Principle of hysteresis module of node voltage

模块的输出。当 $U_i > U_H$ 时, $h_{Hi}=1$; 经过调节后 U_i 降低到区间 $[U_H - U_W, U_H]$ 内, $h_{Hi}=1$; 当 $U_i < U_H - U_W$ 时, $h_{Hi}=0$ 。当 $U_i < U_L$ 时, $h_{Li}=1$; 经过调节后 U_i 上升到区间 $[U_L, U_L + U_W]$ 内, $h_{Li}=1$; 当 $U_i > U_L + U_W$ 时, $h_{Li}=0$ 。

当节点电压发生越限时, 节点电压控制模块触发生节点电压优化量 ΔU_{si} , 如式(14)所示。

$$\Delta U_{si} = f_{OR}(h_{Hi}, h_{Li}) \left[k_{Ps}(U_i - U_{ri}) + k_{Is} \int (U_i - U_{ri}) dt \right] \quad (14)$$

其中, k_{Ps} 、 k_{Is} 分别为节点电压控制中 PI 控制器的比例、积分参数; 函数 $f_{OR}(h_{Hi}, h_{Li})$ 代表 h_{Hi} 和 h_{Li} 任意为 1 时其取值为 1, 否则为 0; U_{ri} 为节点电压模块参考值, 如式(15)所示。

$$U_{ri} = \begin{cases} U_H & U_i \geq U_H \\ U_L & U_i \leq U_L \\ U_i & U_L < U_i < U_H \end{cases} \quad (15)$$

若节点 i 电压越上限, 滞环模块输出 $h_{Hi}=1$, $U_{ri}=U_H$ 。 $U_i - U_H > 0$, 则 $\Delta U_{si} > 0$ 。当电压经过调节开始低于 U_H , $h_{Hi}=1$, $U_{ri}=U_i$, ΔU_{si} 不变。节点电压越下限的调节过程同理。当电压在合理范围时, $h_{Hi}=0$ 且 $h_{Li}=0$, $\Delta U_{si}=0$ 。

综上所述, 本文所提及及线路损耗及节点电压的有功分配因子 F_i 为:

$$F_i = K'_{pi} P_i + \Delta U_{si} \quad (16)$$

DG 按照有功分配因子一致的原则分配功率, 具体分析如下。

a. 当节点电压未越限时, $\Delta U_{si}=0$, 未考虑线路损耗时 $K'_{pi}=K_{pi}$, 则 DG 按照 $F_i=K_{pi}P_i$ 一致的原则分配功率, 即精确按照初始下垂系数的反比进行分配。

b. 当节点电压未越限时, 考虑线路损耗, DG 按照 $F_i=K'_{pi}P_i$ 一致的原则分配功率, 即按照线损下垂系数的反比进行分配。若随着 DG 输出功率变大, 线路损耗会增加, 由上述分析可知 $K'_{pi} > K_{pi}$, DG 按线损下垂系数分配的功率比按初始下垂系数得少。与传统精确按照初始下垂系数反比分配功率的策略相比, 所提策略基于有功分配因子一致原则分配功率, 牺牲了小部分的功率分配精度以降低线路损耗, 但是相比下垂控制, 仍可明显提高功率分配精度, 实现协调有功功率分配精度提高和线路损耗降低 2 个冲突目标。

c. 当节点电压发生越限时, 若节点 i 电压越上限, $\Delta U_{si} > 0$, 叠加在 $K'_{pi}P_i$ 上, 则 F_i 增大, 在功率分配中 DG 需要输出的功率减少, 从而降低输出端电压。当电压经过调节低于 U_H 时, ΔU_{si} 不变, 从而将节点电压稳定在 U_H 以下。电压越下限的调节过程同理。电压在合理范围时不触发节点电压控制。

2.2.2 实现方法

本文策略的分布式实现利用信息交互模块基于稀疏通信网络与邻居节点交互信息, 采用如式(17)所示的一致性算法^[19]进行信息处理。

$$x_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j[k] \quad (17)$$

其中, $k(k=0, 1, \dots)$ 为离散时间变量; d_{ij} 为邻居节点 j 的状态 x_j 作用在节点 i 状态的权重系数; $x_j[k]$ 为节点 j 的状态量经过第 k 次迭代得到的值; $x_i[k+1]$ 为节点 i 的状态量基于 $x_i[k]$ 和 $x_j[k]$ 信息进行第 $k+1$ 次迭代更新的状态。将式(17)转化为矩阵形式, 即:

$$X[k+1] = DX[k] \quad (18)$$

其中, D 为一致性迭代矩阵, D 中元素为 d_{ij} 。当 D 构造为双随机矩阵时, 系统渐进收敛于初始状态变量的平均值^[19]。

系统收敛所需迭代次数 K 可估计为^[19]:

$$K = 1/\log_\varepsilon |\lambda_2| \quad (19)$$

其中, ε 为收敛精度要求; λ_2 为 D 的第二大特征值。由式(19)可知, 一致性算法的收敛速度与 λ_2 有关, λ_2 越小, 收敛速度越快, 因此可设计 λ_2 更小的矩阵 D 以提高收敛速度。

本文采用一种基于邻居节点数的 Metropolis 方法构造矩阵 D ^[19], 如式(20)所示, 具有较好的收敛速度, 并且能够适应网络拓扑的变化。

$$d_{ij} = \begin{cases} 1/(\max(n_i, n_j)+1) & j \in N_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} 1/(\max(n_i, n_j)+1) & i=j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

其中, N_i 为与节点 i 通信的邻居节点集合; n_i 、 n_j 分别为节点 i 、邻居节点 j 的邻居个数; $\max(n_i, n_j)$ 表示取 n_i 和 n_j 中的最大值。

分布式 P - V 二级协调控制策略利用信息交互模块在时钟脉冲的驱动下基于前述一致性算法进行信息交互和信息处理。首先采集本地节点电压, 然后与邻居交互节点电压信息。节点 i 利用本地节点电压和所接收邻居节点电压信息, 根据式(8)、(9)和式(16)计算得到本地有功分配因子 F_i , 记作 $F_i[0]$, 再与邻居节点交互有功分配因子状态, 按式(17)、(20)进行一致性迭代, 如式(21)所示。

$$F_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} F_j[k] \quad (21)$$

其中, $F_j[k]$ 为节点 j 的有功分配因子状态经过第 k 次更新得到的值。式(21)一致性迭代收敛后, 将收敛值作为有功分配因子平均估计值 F_{avei} , 根据式(22)得到 DG 输出目标功率。

$$P_i^* = (F_{avei} - \Delta U_{si}) / K'_{pi} \quad (22)$$

分布式 P - V 协调控制根据式(23)产生有功电压优化量 ΔU_{pi} 。

$$\Delta U_{pi} = k_{pp}(P_i^* - P_i) + k_{ip} \int (P_i^* - P_i) dt \quad (23)$$

其中, k_{pp} 、 k_{ip} 分别为 P - V 协调控制中 PI 控制器的比例、积分参数。

2.3 分布式系统平均电压二级控制策略

为了解决系统负荷较大导致的电压跌落问题,从系统整体角度进行电压优化,提出分布式系统平均电压二级控制策略。

节点利用信息交互模块与邻居节点交互节点电压状态信息,按式(17)、(20)所述一致性算法进行电压一致性迭代如式(24)所示,经图4所示二级控制收敛得到系统平均电压估计值 U_{avei} 。

$$U_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} U_j[k] \quad (24)$$

其中, $U_j[k]$ 为节点 j 的电压状态经过第 k 次更新得到的值。

分布式系统平均电压二级控制根据式(25)可得到系统电压优化量 ΔU_{gi} 。

$$\Delta U_{gi} = k_{pg}(E_N - U_{avei}) + k_{ig} \int (E_N - U_{avei}) dt \quad (25)$$

其中, k_{pg} 、 k_{ig} 分别为系统平均电压二级控制中PI控制器的比例、积分参数。

综上所述,本文所提分布式P-V协调控制最终产生下垂曲线的综合电压优化量如式(26)所示。

$$\Delta E_i = \Delta U_{pi} + \Delta U_{gi} \quad (26)$$

3 仿真分析

3.1 仿真模型

为了验证所提控制策略的有效性,本文基于MATLAB/Simulink仿真平台建立交流微电网模型见附录中图A1,包括通信网络和电力网络2个部分,系统参数见附录中表A1。各节点间建立如附录中图A1所示的稀疏通信网络,仿真中分布式一致性迭代运算的通信周期为0.001s,分布式一致性迭代的运算周期为12次,根据式(20)计算得到各权重系数 d_{ij} 如式(27)所示。

$$D = [d_{ij}]_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 0 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 \\ 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 0 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (27)$$

3.2 分布式P-V协调控制策略效果分析

3.2.1 负荷扰动及电压优化控制效果分析

所提策略在负荷扰动下的有效性以及电压优化控制的效果如图6所示。图中, U_i 、 U_{ave} 为标么值,后同。具体仿真分析过程如下。

(1)如图6(a)~(c)所示,在第0.2s前,DG在下垂控制的作用下自动分配功率,系统稳定运行,但是受线路阻抗的影响,有功功率分配精度较低,容量大的DG,输出的有功功率较少。系统平均电压偏离额定值,有功分配因子差异较大。

(2)第0.2s时启动所提分布式P-V协调控制策略,利用分布式系统平均电压二级控制优化下垂控

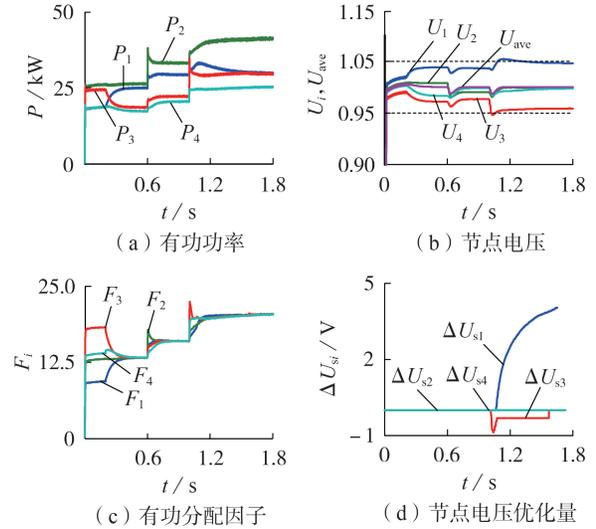


图6 系统中各DG参数的仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of DGs' parameters of system

制参数,按照有功分配因子一致的原则分配功率。如图6(a)~(c)所示,容量大的DG₁和DG₂输出有功功率较多,容量小的DG₃和DG₄输出有功功率较少,系统平均电压调节至额定值,各DG的有功分配因子趋于一致。所提策略可提高有功功率分配精度,并实现系统平均电压调节。

(3)第0.6s负荷增加,如图6(a)~(c)所示,在所提分布式P-V协调控制策略下,经过短时暂态调节后系统稳定运行,稳态时系统平均电压再次调节至额定值,容量大的DG₁和DG₂输出有功功率较多,有功分配因子再次趋于一致,所提策略有效性不受负荷波动的影响。

(4)第1s时负荷增加,如图6(b)、(d)所示,DG₁和DG₃的电压分别越上限和越下限,触发节点电压控制策略,产生节点电压优化量加入有功分配因子中,经过短暂调节,DG₁和DG₃的电压逐渐调节至合理范围内。

3.2.2 提高有功功率分配精度效果分析

本文采用有功不均衡度 β 表示有功功率分配精度,定义如式(28)所示,有功不均衡度越小,说明功率分配精度越高。

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - P_{bi}}{P_{bi}} \right| \times 100\% \quad (28)$$

其中, P_{bi} 为DG按照初始下垂系数分配的有功功率,根据式(29)计算得到。

$$P_{bi} = \frac{\sum_{j=1}^n P_j}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{K_{pj}}} \quad (29)$$

3种不同负荷情景下的DG输出有功功率及有

功不平衡度如表1所示,表中负荷消耗有功 P_{Load} 为77、97、117 kW分别代表系统轻载、次重载和重载3种情景。下垂控制由于受线路阻抗的影响较大,3种情景的有功不平衡度均较高,功率分配精度较低。3种情景下所提策略的有功不平衡度均较低,但重载时相比轻载略有增加,是由于重载时线路损耗较大,所提策略计及线路损耗的影响,基于线损系数优化后的有功分配因子分配功率,因此牺牲了小部分功率分配精度用于降低线路损耗,但3种情景下的有功不平衡度仍显著低于下垂控制,所提策略在考虑线路损耗的影响下仍可有效提高有功功率分配精度。

表1 不同负荷情景下2种策略的有功功率及不平衡度对比

Table 1 Comparison of active power and disequilibrium degree between two strategies under different load scenarios

P_{Load}/kW	控制策略	P_1/kW	P_2/kW	P_3/kW	P_4/kW	$\beta/\%$
77	下垂控制	21.25	24.71	19.42	15.54	9.6
	所提策略	23.78	24.54	16.67	16.04	1.7
97	下垂控制	25.34	38.70	22.34	16.77	17.5
	所提策略	29.25	32.76	20.98	19.82	4.3
117	下垂控制	27.30	43.01	33.73	21.34	22.8
	所提策略	35.05	39.39	27.14	23.80	6.2

3.2.3 降低线路损耗效果分析

将本文所提策略与传统功率比例控制策略^[8]进行对比,系统线路损耗见表2。表中, α 为线路损耗减少百分比;从上至下3个时间段的负荷情况分别代表轻载、次重载和重载3种情景。传统功率比例控制的系统线路损耗较大,比例控制虽然能够实现功率精确按容量比例分配,但是节点间电压差较大,导致系统线路损耗较大。所提策略的线路损耗较低,并且随着系统负荷越重,降低线路损耗的效果越好。可见所提策略利用考虑线损的有功分配因子分配功率,能够在一定程度上降低系统线路损耗。

表2 不同负荷情景下的2种策略的系统线路损耗

Table 2 System line losses of two strategies under different load scenarios

时间段	控制策略	P_L/kW	$\alpha/\%$
[0.2, 0.6) s	比例控制	2.92	—
	所提策略	2.89	1.1
[0.6, 1) s	比例控制	5.87	—
	所提策略	5.73	2.4
[1, 1.4) s	比例控制	9.04	—
	所提策略	8.69	3.9

3.2.4 电压控制效果分析

图7为3种策略的电压控制效果对比图,由上至下分别为下垂控制、传统功率比例控制策略^[8]及本

文所提策略。由图可知,下垂控制和功率比例控制策略下,0~0.6 s负荷较轻,系统平均电压偏离额定值;第0.6 s时负荷增加,系统平均电压随着负荷的增加而降低;第1.2 s时负荷增加,系统负荷较重,系统平均电压跌落较大,偏离额定值较远。本文所提策略下,0~0.6 s系统平均电压运行在额定值,第0.6 s和1.2 s时负荷增加,由于采用分布式系统平均电压二级优化控制,经过短暂调节后系统平均电压仍稳定在额定值,可见系统平均电压不受负荷扰动的影响。

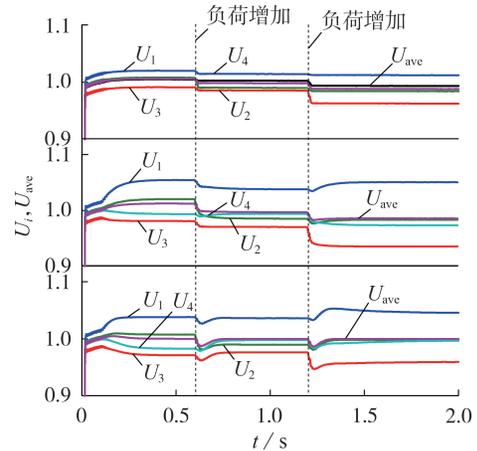


图7 3种策略的电压控制效果对比

Fig.7 Comparison of voltage control effects among three strategies

此外第1.2 s时负荷增加,功率比例控制策略由于进行有功功率比例调节,各节点间的电压差大于下垂控制, DG₁和 DG₃的节点电压发生越限。所提策略下第1.2 s时 DG₁和 DG₃的节点电压发生越限,触发节点电压控制模块产生节点电压优化量,电压逐渐调节回正常范围内。所提策略可将系统平均电压调节至额定值,实现系统层面的电压优化,并控制各节点电压在合理范围内。

3.2.5 通信延迟和部分通信链路中断影响分析

为进一步分析更贴近实际的策略效果,下面仿真不同通信延迟和部分通信链路中断情形对所提策略的影响。

仿真结果见附录中图A2,第0.2 s时启动所提分布式P-V协调控制策略。图A2(a)~(c)对比分析了不同通信延迟情况下的有功分配因子一致性迭代过程,无延迟时有功分配因子一致性渐进收敛较快;延迟1 ms即1个通信周期时,对一致性收敛影响较小;延迟2 ms对一致性迭代影响较大,收敛呈现振荡态势,收敛速度较慢。对比图A2(d)、(e)与图6(c)可知,通信延迟下各DG的有功分配因子仍能实现一致,通信延迟不影响策略按有功分配因子一致的原则分配功率。图A2(f)对比了不同通信延迟下的系统平均电压调节过程,不同通信延迟下系统平

均电压稳态时均可调节至额定值,但是较大的延迟导致暂态调节过程变慢且超调较大。通信延迟虽然不影响所提策略的稳态控制效果,但是较大的延迟影响策略的暂态调节过程。

若通信过程中第0.4 s时DG₃和DG₄间的通信链路突然发生故障中断(如附录中图A3所示),策略的仿真结果见附录中图A4。通信链路中断,则DG₃和DG₄接收不到对方所发送的信息,信息交互模块按式(20)自适应修改一致性算法的权重系数为 $d_{34}=0$ 、 $d_{33}=2/3$ 、 $d_{43}=0$ 和 $d_{44}=2/3$,按式(21)、(24)利用新的权重系数进行一致性迭代。由图A4(d)可看出,0.4 s后由于权重系数和节点所接收信息发生变化,一致性迭代收敛速度变慢,一致性收敛结果影响较小。如图A4(a)—(c)所示,第0.6 s时负荷增加,稳态时所提策略仍能实现按照有功分配因子一致分配功率,调节系统平均电压至额定值,因此通信链路中断对一致性迭代过程影响较大,对所提策略稳态效果影响较小。

4 结论

本文针对低压孤岛微电网,重点研究一级控制采用P-V/Q-f下垂控制时的二级优化控制问题,提出了分布式P-V协调控制策略,具体研究结论如下:

(1)本文通过设计基于线损系数的有功分配因子,提出有功分配因子一致的功率分配方法,在有功功率分配中考虑线路损耗的影响,仿真结果验证所提策略在一定程度上能够削弱线路阻抗对功率分配精度的影响,相比传统精确比例控制,线路损耗较低;

(2)电压控制兼顾系统和局部2个层次,一方面调节系统平均电压至额定值,另一方面为了防止个别节点电压越限,提出节点电压控制策略,将节点电压优化量加入有功分配因子中,实现在功率分配的过程中控制节点电压在合理范围内;

(3)本文所提策略基于稀疏通信网络,仅需邻居节点间交互信息,利用一致性算法获取有功分配因子平均估计值和系统平均电压估计值用于二级控制,相比传统集中式策略不依赖于中心控制器,可靠性较高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[2] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报,2014,29(2):1-12.

WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[3] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.

[4] DIAZ N L, LUNA A C, VASQUEZ J C, et al. Centralized control architecture for coordination of distributed renewable generation and energy storage in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5202-5213.

[5] HE J W, LI Y W, GUERRERO J M, et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5272-5282.

[6] NUTKANI I U, LOH P C, BLAABJERG F. Droop scheme with consideration of operating costs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1047-1052.

[7] 乐健,周谦,赵联港,等. 基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):44-54.
LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 44-54.

[8] LU X, YU X, LAI J, et al. A novel distributed secondary coordination control approach for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2726-2740.

[9] SCHIFFER J, SEEL T, RAISCH J, et al. Voltage stability and reactive power sharing in inverter-based microgrids with consensus-based distributed voltage control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 96-109.

[10] ZHANG H G, KIM S, SUN Q Y, et al. Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1749-1761.

[11] 周晓倩,艾芊. 基于自适应经济下垂控制的微电网分布式经济控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):50-55.
ZHOU Xiaolian, AI Qian. Distributed economic control of microgrid based on adaptive economic droop control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 50-55.

[12] 邓思成,陈来军,郑天文,等. 考虑系统延时的微电网有功功率分布式控制策略[J]. 电网技术,2019,43(5):1536-1542.
DENG Sicheng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Active power distributed control of microgrids considering system time delays[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1536-1542.

[13] XU Y L, GUO Q L, SUN H B, et al. Distributed discrete robust secondary cooperative control for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3620-3629.

[14] SIMPSON-PORCO J W, SHAFIEE Q, DORFLER F, et al. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7025-7038.

[15] 张忠,王建学,刘世民. 计及网络拓扑下微电网有功调节对电压控制的适应性分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):22-29.
ZHANG Zhong, WANG Jianxue, LIU Shimin. Adaptability of active-power adjustment to voltage control considering network topology of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 22-29.

[16] LU L Y, CHU C C. Consensus-based droop control synthesis for multiple DICs in isolated micro-grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2243-2256.

- [17] GOLSORKHI M S, SHAFIEE Q, LU D D, et al. Distributed control of low-voltage resistive AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 573-584.
- [18] CHEN J B, YUE D, DOU C X, et al. A virtual complex impedance based P - V droop method for parallel-connected inverters in low-voltage AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(3): 1763-1773.
- [19] XU Y, LIU W. Novel multiagent based load restoration algorithm for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 152-161.

作者简介:



苏晨

苏晨(1992—),女,山东济宁人,硕士,主要研究方向为分布式发电与微电网(E-mail:suchenxy@163.com);

吴在军(1975—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为变电站自动化、分布式发电与微电网、电能质量分析与控制(E-mail:zjwu@seu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Distributed P - V coordinated control strategy for islanded microgrid

SU Chen, WU Zaijun, DOU Xiaobo

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To improve the accuracy of active power allocation and reduce line loss, a distributed P - V coordinated control strategy of islanded microgrid is studied. A design method of active power allocation factor considering line loss coefficient and node voltage optimization is put forward. The power distribution method based on the consistency principle of active power allocation factor is investigated. The distributed sparse communication network is used for information exchange. According to the consensus algorithm, the average estimated value of active power allocation factor and the estimated value of system average voltage required for the secondary control are obtained. The comprehensive quantity for voltage optimization is generated to complete the droop control optimization. Therefore the distributed P - V coordinated control strategy of islanded microgrid can be realized. The proposed strategy can effectively take into account the reduction of line loss and the accuracy improvement of active power allocation, control the voltage of each node within a reasonable range, and adjust the system average voltage to the rated value. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified based on MATLAB/Simulink.

Key words: islanded microgrid; P - V / Q - f droop control; distributed P - V coordinated control strategy; active power allocation factor; consensus algorithm

附录

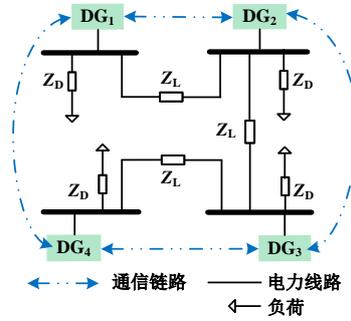


图 A1 微电网模型结构

Fig.A1 Microgrid model structure

表 A1 系统参数表

Table A1 Parameters of system

参数	数值	参数	数值
f_N	50/ Hz	K_{q1}/K_{q2}	0.017/ (Hz kvar ⁻¹)
E_N	311/V	K_{q3}/K_{q4}	0.025/ (Hz kvar ⁻¹)
E_{max}	326/V	K_{p1}/K_{p2}	0.5/ (V kW ⁻¹)
E_{min}	296/V	K_{p3}/K_{p4}	0.75/ (V kW ⁻¹)
Z_D	0.2+j0.031 4 Ω	k_{Pg}	0.02
Z_L	0.5+j0.069 1Ω	k_{Ig}	20
k_{Pp}	0.01	k_{Ps}	4
k_{Ip}	25	k_{Is}	50

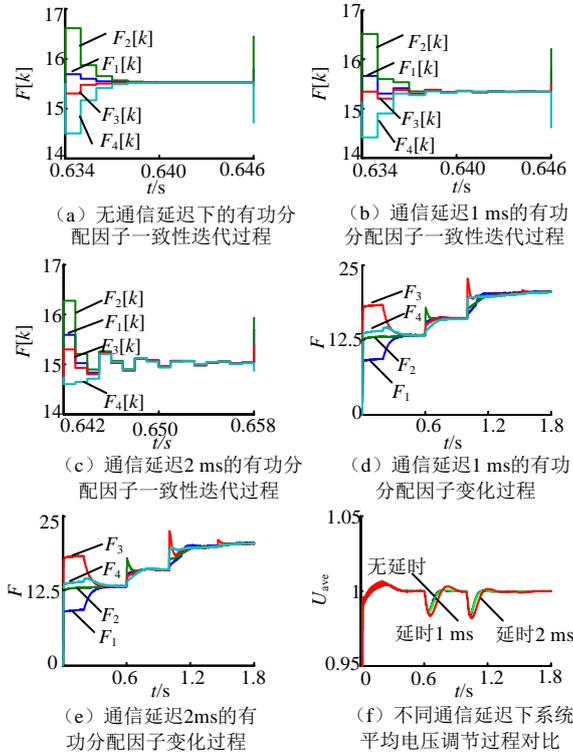


图 A2 不同通信延迟下的策略效果对比

Fig.A2 Comparison of proposed strategy effects under different communication delays

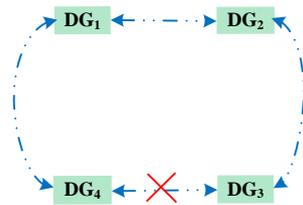


图 A3 通信链路中断示意图

Fig.A3 Schematic diagram of communication link interruption

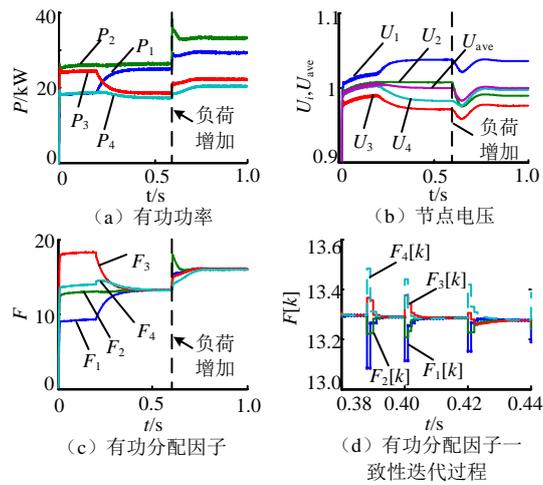


图 A4 通信链路中断对所提策略的影响

Fig.A4 Impact of a communication link interruption on the proposed strategy