

孤岛模式下多源直流微电网经济运行的协调优化控制策略

董密¹, 张心露¹, 杨建¹, 欧静¹, 宋冬然¹, 肖国勋²

(1. 中南大学自动化学院, 湖南长沙 410083;

2. 长沙贝士德电气科技有限公司, 湖南长沙 410205)

摘要: 基于直流微电网的时变性与分布式发电单元的不确定性, 本文提出了一种最小化运行成本的多源协调优化控制策略。首先, 建立了优化调度模型, 通过完全分布式的控制框架, 设计了实时经济运行的优化方案, 以实现直流微电网系统分布式发电的负载分配、电压恢复以及经济最优。此外, 由于三个变量的动态变化值被引入到一致性算法中, 功率分配优化过程是实时的。最后, 用仿真算例来对上述优化策略进行验证。结果表明, 提出的控制策略可有效地实现分布式发电的最优功率分配, 达到最小化运行成本的目标。当直流微电网系统中单元的成本函数或功率限制发生变化时, 能够实现在线优化。

关键词: 直流微电网; 分布式电源; 协调优化; 经济运行

DOI: 10.12067/ATEEE1903005

文章编号: 1003-3076(2019)05-0051-08

中图分类号: TM732

1 引言

由于直流负荷的日益增多以及直流分布式电源(Distributed Generator, DG), 例如太阳能光伏发电、风力发电和储能发电机的发展, 直流微电网受到了国内外学者及电力工业界的关注^[1,2]。相比于交流微电网, 直流微电网具有较大优势, 例如, 大容量传输线, 高度可靠的电源, 不需要考虑频率同步和无功功率以及更加适合负载接入等^[3,4]。因此, 开展对直流微电网的深入研究, 对整个能源和电力行业实现节能减排、能源可持续发展和多样化供电具有重要意义。

直流微电网作为一个复杂的供电系统, 在孤岛模式下需要对每个 DG 及储能设备进行合理的功率分配及优化配置, 从而实现高效可靠的电流、电压及功率的控制, 并在整个系统达到功率供需平衡的前提下实现直流微电网的优化运行^[5-7]。下垂控制^[8]被广泛用于直流微电网的电压调节, 并能实现电流分配, 且不存在数字通信链路。但是基本下垂方法不能实现具有不同特征的多个部件的协调性能, 而

且由于线路阻抗的影响, 会引发直流电压稳态偏差和均流精度下降。

随着多代理系统的进步, 基于高可靠性的分布式通信网络的协调控制方法已经被用来解决直流微电网的控制问题^[9]。文献[10]在下垂控制的基础上, 利用有限时间一致性协议, 实现了各分布式电源的输出电流按比例分配和电压协同调节, 满足了 DG 即插即用的要求。文献[11]基于分布式发电机的额定功率和瞬时功率开发了移位电压技术, 有效地补偿了由传统下垂控制器引起的压降, 使得无论负载如何变化都可以恒定地调节直流母线电压。文献[12]提出了一种适用于含光伏和储能装置的分层分布式协调控制策略, 第一层控制中下垂系数可进行自适应调整以平衡蓄电池的荷电状态, 第二层控制可实现二次电压恢复和电流均分控制。

然而, 上述这些方法仅仅解决了电流分配和电压恢复问题, 而没有将优化调度问题考虑在内。为了实现直流微电网的经济运行, 文献[13]基于改进的分布式梯度算法, 提出了基于多智能体系统的分布式控制解决方案, 可以实现等式约束和不等式约

收稿日期: 2019-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677194)、中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018zzts559)、工业强基工程项目(0714-EMTC-02-00443)

作者简介: 董密(1976-), 女, 湖南籍, 教授, 博士, 主要研究方向为微电网与智能电网、电力系统自动化; 张心露(1995-), 女, 四川籍, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电与智能电网。

束下最优的功率分配。文献[14]提出一种基于一致性理论的分布式优化调度方法,通过自治节点与相邻分布式电源节点信息的交换,采用一致性算法进行迭代计算,使各分布式电源的增量成本一致趋同。文献[15]提出了一种分布式经济下垂控制策略,该策略利用分布式一致性算法来迭代寻找发电单元的最优经济运行点,并同时改变下垂控制系数来使输出功率收敛到最优运行点。文献[16]基于交替方向乘法器,通过使用无中心算法和投影方法,获得了对经济调度问题的完全分布式解决方案。文献[17]在问题公式中假设二次凸成本函数,将估计得到的需求与发电总量之间的不匹配用作反馈机制,以调整每个发电机的当前发电量,最终实现自动降低总成本。

考虑直流微电网的时变性与分布式发电单元的不确定性,本文提出了一种最小化发电成本的DG协调控制策略,在保持直流微电网的功率平衡的同时,通过结合了等微增率原则的一致性算法实现了实时的最优功率分配,并且在最小化发电成本的基础上解决了由下垂控制带来的电压跌落问题。在该策略中提出的框架是完全分布的,每个发电单元只需要与通信网络上的邻居共享信息。此外,协调控制和功率分配优化过程同时发生,如果分布式发电单元的成本函数或功率限制发生变化,则可以进行在线优化。

2 直流微电网的运行成本优化模型

直流微电网是一种微型自主电源-电网负载系统,可以通过静态转换开关在并网模式或孤岛模式下运行^[18],其基本结构如图1所示。本文研究在孤岛模式下运行的直流微电网。

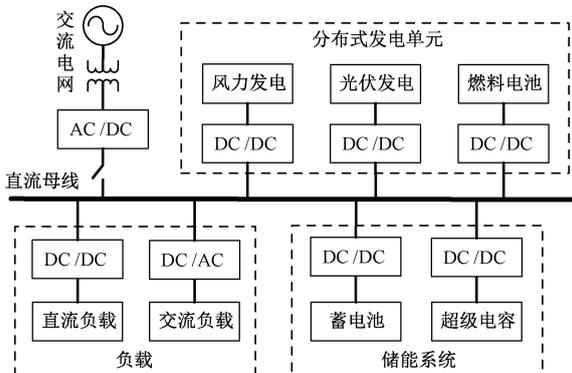


图1 典型的直流微电网结构

Fig.1 Typical structure for DC microgrid

在直流微电网中,由于光伏发电、风力发电等可再生能源具有较大的间歇性以及波动性,同时考虑到燃气轮机、燃料电池等可控电源污染气体的排放、线路损耗及负载波动等问题,直流微电网的优化实际上是一个多目标多约束优化问题^[19],可以描述为:

$$\min F(x) = \min[f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x)] \quad (1)$$

式中, $F(x)$ 为带有 N 个目标函数的向量,组成目标空间; x 为系统优化变量; $f_i(x)$ 为多目标优化中的子目标函数,其中 $i = 1, 2, \dots, N$ 。假设有 N 个分布式发电单元在直流微电网系统中运行,优化调度的目标被定义为最小总运行成本,即

$$F = \min \sum_{i=1}^N f_i(P_i) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_N]$,为传统发电机的发电矢量; f_i 为DG i 的成本函数。本文研究的直流微电网多目标优化中目标函数主要包括经济运行成本最小、污染气体排放最少及线路损耗最小三个方面。通常,可以用二次函数来逼近DG的运行成本函数:

$$f_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (3)$$

式中,成本系数 a_i 、 b_i 和 c_i 都是正实数。该函数包含了发电成本、维修成本等。

优化问题的一个制约因素是系统的功率平衡,可以描述如下:

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}} - P_{\text{res}} = P_d \quad (4)$$

式中, P_{load} 和 P_{res} 分别为总负荷功率和可再生能源的产生量; P_{loss} 为传输过程中在线路上损耗的功率; P_d 为传统发电机的净负荷。同时, P_i 还应受到DG的容量限制,即

$$P_{i_{\min}} \leq P_i \leq P_{i_{\max}} \quad (5)$$

式中, $P_{i_{\min}}$ 和 $P_{i_{\max}}$ 分别为第 i 个DG的最小、最大功率输出值。因此,得到系统的优化模型为:

$$\begin{cases} \min F = \min \left[\sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \right] \\ \text{s. t.} \\ \sum_{i=1}^N P_i = P_d \\ P_{i_{\min}} \leq P_i \leq P_{i_{\max}} \end{cases} \quad (6)$$

3 分布式一致性算法

3.1 分布式通信网络

本文采用基于分布式网络模型的优化控制算法,其模型如图2所示。图2中的 x_i 为第 i 个DG

的状态信息,包括电压、功率及中间变量等。具有 N 个节点的通信网络图可以由邻接矩阵表示:

$$A = [a_{ij}] \in R^{N \times N} \quad (7)$$

如果第 i 个 DG 与第 j 个 DG 之间存在着通信链路,那么 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。

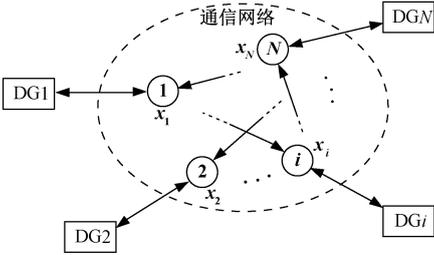


图2 直流微电网的分布式通信网络

Fig. 2 Distributed communications network of DC microgrid

3.2 一致性理论

一致性理论能够利用分布式网络代理通过其邻居状态的加权平均值更新每个单元的状态,从而在某些关键信息或依赖于所有代理状态的公共值上达成一致。根据文献[20],具有理想通信网络的线性一致性协议被描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = u_i \\ \dot{x}_i(t) = - \sum_{j=1}^N a_{ij} [x_i(t) - x_j(t)] \end{cases} \quad (8)$$

式中,代理 i 与代理 j 之间存在通信链路,代理 j 是代理 i 的相邻节点,该节点属于 N_i 。式(8)改写为矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L}\mathbf{x} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$; $\mathbf{L} = [l_{ij}]$, 为拉普拉斯矩阵:

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{i \neq j} a_{ij} & i = j \\ -a_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (10)$$

如果通信网络是双向通信的,即 $a_{ij}=a_{ji}$,则拉普拉斯矩阵的所有行之和等于零,并且被认为是平衡的。在式(8)的作用下,对于任何给定的初始条件,系统中的变量能够达到一致:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0 \quad (11)$$

一致性算法的离散形式可以写成:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} a_{ij} [x_j(k) - x_i(k)] \quad (12)$$

式中, $x_i(k)$ 为节点 i 在第 k 次迭代时的一致变量; ε 为用于调整一致性算法的动态的边缘权重。

4 基于一致性的分布式优化控制策略

4.1 提出的分布式成本优化方案

按照分层控制的基本构架,管理和调度多个发电单元主要是在第三层控制^[21,22]。在实际运行中,总是希望光伏、风机等成本较低的发电单元出力较多而成本较大的燃气轮机、柴油发电机等出力较少,并且由于各种发电单元都有其一定的工作范围,其输出功率范围也不可能是无限的。当负载增大时,如果成本较小的发电单元出力达到上限,系统则需要在剩余的发电单元中重新进行功率的最优分配。

根据直流微电网的运行成本优化模型将 Lagrange 函数建立为:

$$L(P_1, P_2, \dots, P_N, \eta) = \sum_{i=1}^N f_i(P_i) + \eta \left(P_d - \sum_{i=1}^N P_i \right) \quad (13)$$

式中, η 为 Lagrange 乘子。因此,条件极值问题变为非约束最优问题。由于成本函数是严格凸和可微的,因此 Lagrange 函数的最小值通过求解式(14)来实现:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{df_i(P_i)}{dP_i} - \eta = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \eta} = P_d - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \end{cases} \quad (14)$$

即当所有单元的成本微增率相等时,整个系统达到最优分配,此时有:

$$\frac{df_1(P_1)}{dP_1} = \frac{df_2(P_2)}{dP_2} = \dots = \frac{df_N(P_N)}{dP_N} = \eta^* \quad (15)$$

因此,得到最优功率:

$$P_{\text{ref},i} = \frac{\eta^* - b_i}{2a_i} \quad (16)$$

将式(16)两边求和计算可以得到:

$$\eta^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{2a_i}} \sum_{i=1}^N \left(P_i + \frac{b_i}{2a_i} \right) \quad (17)$$

式中, η^* 的表达式上下同时除以 N 求平均值可得:

$$\eta^* = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2a_i}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(P_i + \frac{b_i}{2a_i} \right) \quad (18)$$

因此, η^* 的表达式可以由两个量的平均值表示,令

$$y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2a_i}, z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(P_i + \frac{b_i}{2a_i} \right)$$

可以采用一致性算法的迭代形式来求解 y 和 z 的值,首先设两者的初始值为:

$$y_i(0) = \frac{1}{2a_i}, z_i(0) = P_i(0) + \frac{b_i}{2a_i}$$

然后设计其迭代计算公式为:

$$y_i(k+1) = y_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} [y_i(k) - y_j(k)] + \Delta\alpha_i(k) \quad (19)$$

$$z_i(k+1) = z_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} [z_i(k) - z_j(k)] + \Delta P_i(k) + \Delta\beta_i(k) \quad (20)$$

式中, ε 为与迭代精度相关的系数,通常取 $0 \sim 0.5$; $\Delta\alpha_i(k)$ 和 $\Delta\beta_i(k)$ 分别为第 k 次迭代时的 $\Delta[1/(2a_i)]$ 和 $\Delta[b_i/(2a_i)]$,用于计算当成本函数发生变化时的 η^* ; $\Delta P_i(k)$ 为第 i 个 DG 的输出功率与参考功率之间的差值,其表达式为:

$$\Delta P_i(k) = P_{\text{ref},i}(k) - P_{\text{out},i}(k) \quad (21)$$

可以看出:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \Delta P_i(k) &= \sum_{i=1}^N [P_{\text{ref},i}(k) - P_{\text{out},i}(k)] \\ &= \sum_{i=1}^N P_{\text{ref},i}(k) - \sum_{i=1}^N P_{\text{out},i}(k) \\ &= \Delta P(k) \end{aligned} \quad (22)$$

式中, $\Delta P(k)$ 为总输出功率与系统负载及损耗功率之和之间的差值,即

$$\Delta P(k) = P_d(k) - \sum_{i=1}^N P_{\text{ref},i}(k) \quad (23)$$

成本微增率计算式为:

$$\eta_i(k) = \frac{z_i(k)}{y_i(k)} \quad (24)$$

根据一致性的定义可知,当 k 趋于无穷大时,对于所有 DG 最佳成本微增率值 η^* 计算如下:

$$\eta_i(k \rightarrow \infty) = \frac{z_i(k \rightarrow \infty)}{y_i(k \rightarrow \infty)} = \eta^* \quad (25)$$

考虑 DG 的容量限制,得到参考发电功率:

$$P_{\text{ref},i}(k) = \begin{cases} \frac{\eta_i(k) - b_i}{2a_i} & P_{i_{\min}} < P_{\text{ref},i}(k) < P_{i_{\max}} \\ P_{i_{\min}} & P_{\text{ref},i}(k) \leq P_{i_{\min}} \\ P_{i_{\max}} & P_{\text{ref},i}(k) \geq P_{i_{\max}} \end{cases} \quad (26)$$

综上所述,式(19)~式(21)、式(24)、式(26)构成了整个优化调度方案。

由于引入了 $\Delta\alpha_i(k)$ 和 $\Delta\beta_i(k)$,在迭代过程中,

如果有 DG 的成本函数发生了变化,成本微增率值 η^* 仍然能够收敛到最优值。考虑成本函数变化时的优化方案的流程框图如图3所示。

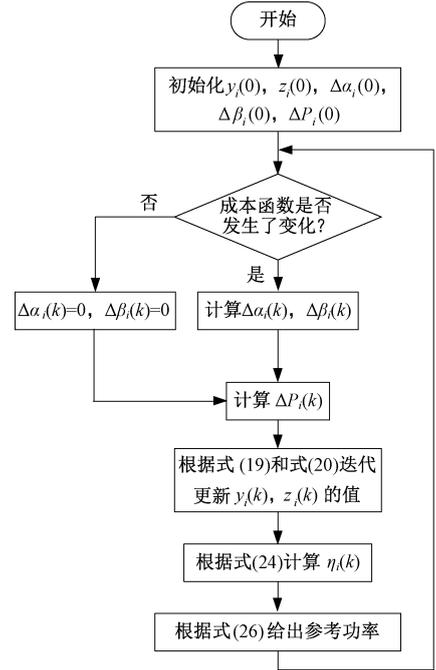


图3 考虑成本函数变化情况下的最优发电功率计算过程

Fig.3 Calculation process of optimal power generation with cost function change

4.2 功率分配和电压恢复

在制定了优化调度方案后,本文采用基于低带宽通信的分布式控制协调控制策略进行负载分配,并恢复由下垂控制引起的电压跌落。分布式控制框图如图4所示。

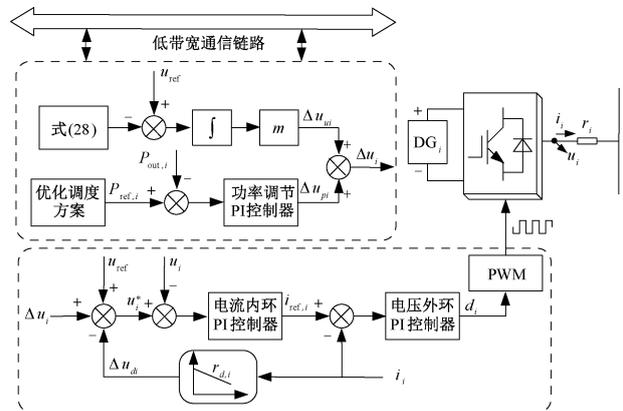


图4 用于功率分配和电压恢复的分布式控制框图

Fig.4 Distributed control block diagram for power distribution and voltage recovery

对于电压恢复问题,引入一个电压不匹配值:

$$\Delta u_{ui} = m \int (u_{\text{ref}} - \bar{u}) dt \quad (27)$$

式中, m 为相关增益系数,用于调节输出电压的收敛速度; \bar{u} 为根据全局电压观测器所获得的平均电压; u_{ref} 为额定平均电压。其中全局平均电压观测器的一致性变量构造为:

$$\bar{u}_i = u_i + \int \sum_{j=1}^{N_i} a_{ij} (\bar{u}_j - \bar{u}_i) dt \quad (28)$$

式中, u_i 为 DG 的输出电压,即电容电压。

为了实现最优功率调度,使输出功率收敛于优化调度方案给出的功率值,采用 PI 控制器引入一个电压附加值来实现功率控制:

$$\Delta u_{pi} = (k_{pi} + \frac{k_{li}}{s}) (P_{\text{ref},i} - P_{\text{out},i}) \quad (29)$$

式中, k_{pi} 和 k_{li} 分别为用于功率调节的 PI 控制器的比例和积分系数。

因此,将 Δu_{pi} 和 Δu_{ui} 引入电压-电流下垂控制,从而实现功率分配和电压恢复。改进的下垂控制策略可表示为:

$$u_i^* = u_{\text{ref}} + \Delta u_{ui} + \Delta u_{pi} - r_{d,i} i_i \quad (30)$$

式中, $r_{d,i}$ 为第 i 个 DG 的下垂系数。

5 仿真分析

为了验证本文所提出的直流微电网经济运行的优化调度方案和分布式控制策略的有效性和动态特性,本文利用 Matlab/Simulink 搭建了具有 5 个不同运行成本单元的直流微电网模型,其中直流微电网系统的额定电压为 220V。各发电单元的控制参数和成本参数分别如表 1 和表 2 所示。另外,不同的通信拓扑对一致性算法的收敛速度有影响,本文采用的通信拓扑结构和电力拓扑结构如图 5 所示。

表 1 5 个发电单元控制参数

Tab. 1 Control parameters of five generators

参数	数值
线路阻抗	$r_1 = r_4 = 0.4\Omega, r_2 = r_5 = 0.6\Omega, r_3 = 0.3\Omega$
下垂系数	$r_{d,1} = r_{d,3} = 1.5, r_{d,2} = r_{d,4} = r_{d,5} = 1$
k_{pi}	$k_{p1} = k_{p2} = k_{p3} = k_{p4} = k_{p5} = 0.02$
k_{li}	$k_{l1} = k_{l2} = k_{l3} = k_{l4} = k_{l5} = 2$

表 2 五个发电单元成本参数

Tab. 2 Cost parameters of five generators

DG <i>i</i>	a_i	b_i	c_i	$P_{i,\text{min}}/\text{W}$	$P_{i,\text{max}}/\text{W}$
1	0.0060	0.15	185	350	1000
2	0.0075	0.15	170	380	950
3	0.0080	0.10	150	240	1000
4	0.0100	0.08	180	300	800
5	0.0125	0.08	200	300	850

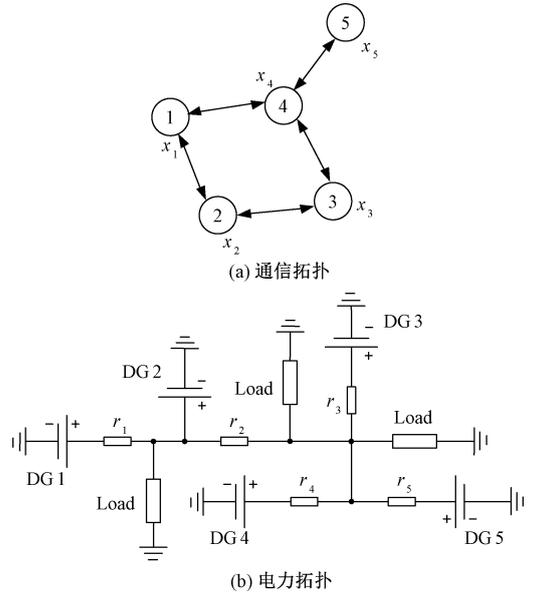


图 5 直流微电网的通信拓扑和电力拓扑
Fig. 5 Communication topology and power topology of DC microgrid

首先,评估负载动态变化以及容量限制变化对系统性能的影响,仿真结果如图 6 所示。由输出电压变化图可以看出,输出电压能够在短时间内保持在额定电压上下。由此表明,提出的分布式协调控制方法能够恢复由下垂控制引起的电压跌落。为了验证系统的动态特性,首先设置负载总功率为 2540W,优化调度方案给出的参考功率为 $\mathbf{P}_{\text{ref}} = [726\text{W } 579\text{W } 552\text{W } 444\text{W } 358\text{W}]$,其中包含了线路损耗功率。可以看出,微增率在 0.3s 左右达到了一致,实现了总运行成本的最小化。此时,5 个 DG 均未达到其容量限制。在 $t = 1\text{s}$ 时,有新的负载接入,负载总功率变为 3784W,优化调度方案给出的参考功率 $\mathbf{P}_{\text{ref}} = [1000\text{W } 927\text{W } 876\text{W } 704\text{W } 567\text{W}]$,DG1 达到了其容量限制。在 $t = 2\text{s}$ 时,DG1 的容量限制由 1000W 增加到 1200W,优化调度方案给出的参考功率为 $\mathbf{P}_{\text{ref}} = [1120\text{W } 893\text{W } 843\text{W } 677\text{W } 545\text{W}]$,5 个 DG 均未达到其容量限制。与 1~2s 相比,由于 DG1 的容量限制范围变大了,所以总运行成本有所减少。

然后,评估成本函数动态变化对系统性能的影响,结果如图 7 所示。当 $t = 1\text{s}$ 时,DG1 的发电成本增加, $f_1(P_1)$ 由 $0.006P_1^2 + 0.15P_1 + 185$ 变为 $0.0085P_1^2 + 0.15P_1 + 185$ 。此时,优化调度方案给出的参考功率为 $\mathbf{P}_{\text{ref}} = [866\text{W } 950\text{W } 922\text{W } 741\text{W } 595\text{W}]$,DG2 达到了其容量限制,总运行成本增加。

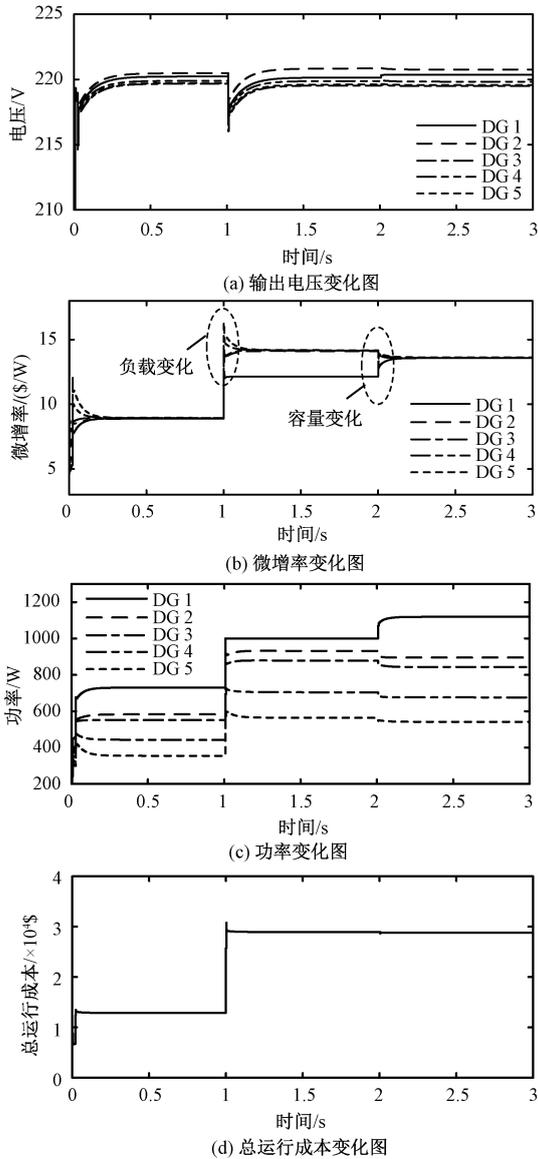


图6 负载变化以及容量限制变化验证结果
Fig. 6 Verification results of load change and capacity limit change

在 $t=2s$ 时, DG1 的发电成本恢复到原来的值, 优化调度方案与之前相同。

6 结论

考虑到直流微电网是一个复杂的供电系统, 其中包含的各种分布式发电单元运行成本各不相同, 甚至可能是时变的, 并且在功率传输的过程中会产生功率损耗, 本文提出一种完全分布式的协调优化控制策略。优化调度方案是通过局部功率不匹配和成本系数变化量来更新成本微增率实现, 能在时变的情况下实现每个 DG 合理的功率分配及优化配置, 从而实现直流微电网的优化运行。基于 5 个具

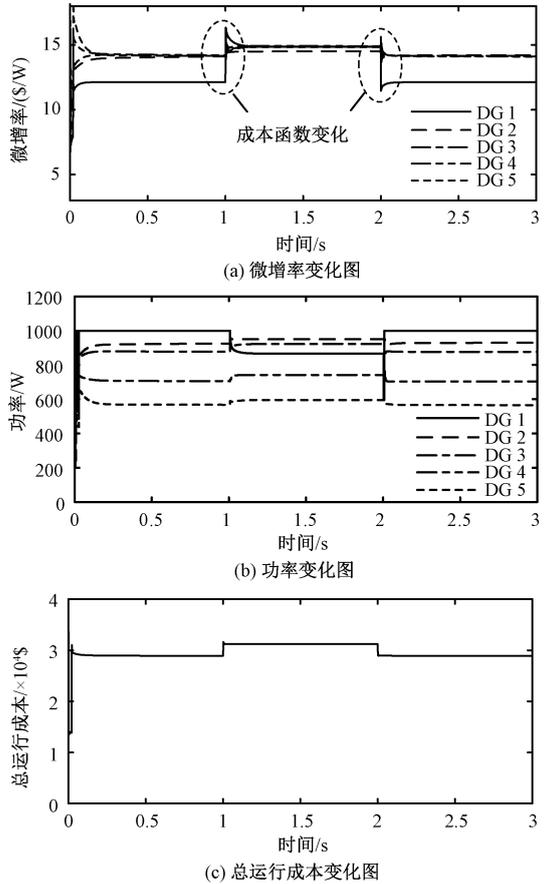


图7 成本函数变化验证结果

Fig. 7 Verification results of cost function change

有不同成本函数和容量限制的 DG 构成的直流微电网模型, 仿真案例重点验证了优化调度的最优性以及分布式协调优化的适应性。结果表明, 提出的协调优化控制策略能够实现直流微电网的经济运行, 对于未来直流微电网发展与应用具有一定的意义。

参考文献 (References):

[1] 郑漳华, 艾芊 (Zheng Zhanghua, Ai Qian). 微电网的研究现状及在我国的应用前景 (Present situation of research on microgrid and its application prospects in China) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2008, 32 (16): 27-31.

[2] Zhao J, Dörfler F. Distributed control and optimization in DC microgrids [J]. Automatica, 2015, 61: 18-26.

[3] 李霞林, 郭力, 王成山, 等 (Li Xialin, Guo Li, Wang Chengshan, et al.). 直流微电网关键技术研究综述 (Key technologies of DC microgrids: An overview) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (1): 2-16.

[4] Kwon M, Choi S. Control scheme for autonomous and

- seamless mode switching of bidirectional DC-DC converters in a DC microgrid [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33 (8): 7094-7104.
- [5] 肖安南,张蔚翔,张超,等 (Xiao Annan, Zhang Weixiang, Zhang Chao, et al.). 需求侧响应下的微网源-网-荷互动优化运行 (Optimal interactive operation of microgrid under demand response) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2017, 36 (9): 71-79.
- [6] Yang N, Gao F, Paire D. Distributed control of multi-time scale DC microgrid based on ADRC [J]. *IET Power Electronics*, 2017, 10 (3): 329-337.
- [7] Kumar J, Agarwal A, Agarwal V. A review on overall control of DC microgrids [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 21: 113-138.
- [8] 王皓界,韩民晓 (Wang Haojie, Han Minxiao), Josep M. Guerrero. 基于 I-V 下垂控制的直流微电网动态特性分析与改善 (Analysis and improvement of DC microgrid dynamic performance based on I-V droop control) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2017, 36 (9): 80-88.
- [9] Kumar D, Zare F, Ghosh A. DC microgrid technology: System architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications and standardizations aspects [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 12230-12256.
- [10] 顾伟,曹戈,薛帅,等 (Gu Wei, Cao Ge, Xie Shuai, et al.). 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协同控制方法 (Finite-time consensus based distributed cooperative control for DC microgrids) [J]. *电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems)*, 2016, 40 (24): 49-55.
- [11] Dam H D, Lee H H. A power distributed control method for proportional load power sharing and bus voltage restoration in a DC microgrid [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54 (4): 3616-3625.
- [12] 朱承治,俞红生,周开河,等 (Zhu Chengzhi, Yu Hongsheng, Zhou Kaihe, et al.). 基于一致性算法的独立直流微电网分层协调控制策略 (Consensus-based hierarchical coordinated for autonomous DC micro-grid) [J]. *电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA)*, 2018, 30 (1): 144-150.
- [13] Zhang W, Liu W, Wang X, et al. Online optimal generation control based on constrained distributed gradient algorithm [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30 (1): 35-45.
- [14] 蒲天骄,刘威,陈乃仕,等 (Pu Tianjiao, Liu Wei, Chen Naishi, et al.). 基于一致性算法的主动配电网分布式优化调度 (Distributed optimal dispatching of active distribution network based on consensus algorithm) [J]. *中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE)*, 2017, 37 (6): 4-15.
- [15] 吕振宇,吴在军,窦晓波,等 (Lv Zhenyu, Wu Zaijun, Dou Xiaobo, et al.). 自治直流微电网分布式经济下垂控制策略 (A distributed droop control scheme for islanded DC microgrid considering operation costs) [J]. *中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE)*, 2016, 36 (4): 900-910.
- [16] Chen G, Yang Q. An ADMM-based distributed algorithm for economic dispatch in islanded microgrids [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14 (9): 3892-3903.
- [17] Yang S, Tan S, Xu J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28 (4): 4416-4426.
- [18] 杜少飞,谢文超,朱永强,等 (Du Shaofei, Xie Wenchao, Zhu Yongqiang, et al.). 并网型直流微电网主动协调控制方法研究 (Research on active coordination control method for grid-connected DC microgrid) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2017, 36 (6): 30-38.
- [19] 吴定会,高聪,纪志成 (Wu Dinghui, Gao Cong, Ji Zhicheng). 混合粒子群算法在微电网经济优化运行的应用 (Economic optimization operation of the microgrid using the hybrid particle swarm optimization algorithm) [J]. *控制理论与应用 (Control Theory & Applications)*, 2018, 35 (4): 39-49.
- [20] Meng D, Jia Y, Du J. Finite-time consensus protocols for networks of dynamic agents by terminal iterative learning [J]. *International Journal of Systems Science*, 2014, 45 (11): 2435-2446.
- [21] 余志文,艾芊,熊文 (Yu Zhiwen, Ai Qian, Xiong Wen). 基于多智能体一致性协议的微电网分层分布实时优化策略 (Hierarchical distribution real-time optimization strategy for microgrid based on consistency protocol of multi-agent system) [J]. *电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems)*, 2017, 41 (18): 25-32.
- [22] Palizban O, Kauhaniemi K. Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 797-813.

Coordinated optimization control strategy for economic operation of multi-source DC microgrid in island mode

DONG Mi¹, ZHANG Xin-lu¹, YANG Jian¹, OU Jing¹, SONG Dong-ran¹, XIAO Guo-xun²

(1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Changsha Best Electric Technology Co., Ltd., Changsha 410205, China)

Abstract: Based on the time-varying of DC microgrid and the uncertainty of distributed generation units, this paper proposes a multi-source coordinated optimization control strategy that minimizes operating costs. Firstly, the optimal scheduling model is established. Using the fully distributed control framework, the real-time economic operation optimization scheme is designed to realize the load distribution, voltage recovery and economic optimization of distributed generation of DC microgrid system. In addition, the power allocation optimization process is real-time because the dynamic change values of the three variables are introduced into the consensus algorithm. Finally, a simulation study is used to verify the above optimization strategy. The result proves that proposed control strategy can effectively achieve the optimal power allocation of distributed generation and achieve the goal of minimizing operating costs. Online optimization can be achieved when the cost function or power limit of a unit in a DC microgrid system changes.

Key words: DC microgrid; distributed generator; coordinated optimization; economic operation