

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.006

基于一致性理论的多源直流配网功率自适应控制策略

李付强¹, 汤茂东², 曲小慧², 陈武², 董焯¹, 潘艳¹

(1. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:在含高比例分布式电源的直流配网中,为实现有效的功率均衡与调度,文中提出一种基于一致性理论的分布式自适应功率协调控制策略,系统中各单元光伏、储能等均为可参与调度与控制的节点。提出将功率偏差和均衡系数同时作为各个节点间状态变量,各个节点通过相邻节点间状态变量交互和迭代,多组分布式电源可根据调度指令等自适应调整运行状态。在有效接受实时调度指令和储能最优控制的前提下,充分利用分布式电源自身的调节能力平抑系统内源荷功率不平衡,并且通过修正分布式电源的功率参考指令,保证各组分布式电源在不同运行场景下承担的功率和其额定容量成正比。当个别分布式电源因出力有限而失去调节能力时,仍可确保其他单元利用率的均衡。多种场景下的仿真结果验证了所提策略的有效性。

关键词:直流配网;分布式电源;分布式控制;一致性理论;功率分配;调度指令

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)03-0044-09

0 引言

分布式电源以及直流负荷的接入加剧了直流配网中源-荷双向功率流动的不确定性^[1-2],因此已有运行控制越来越侧重分布式电源的主动管理与消纳^[3-4]。主动调控系统内多组分布式电源的出力将有利于直流配网的高效、稳定运行^[5-6]。

目前涉及直流配网运行控制的研究主要围绕三方面展开:降低对通信的依赖^[7-9]、减少母线电压波动^[9-10]、实现新的控制优化目标^[11-14]。文献[7-9]提出一类典型的基于母线电压分区控制的分散式控制策略,这类方法无须通信,但存在电压稳态误差,且只能实现基本的功率约束,无法响应调度指令等上层目标。文献[10]提出一种基于混合储能的多模式电压稳定控制策略,可保证母线电压基本恒定,但须采集系统状态信息并下达统一控制指令,属于集中式控制,通信依赖度高,且主要针对孤岛模式,当前储能仍然受到规模、成本等约束。文献[11]提出一种分布式的源-荷协同优化策略,将调频控制和一致性算法相结合,充分调动分布式电源自身调节能力,兼具经济调度特性,但只能实现整体功率平衡约束,未考虑多组分布式电源间的功率分配和分布式电源失去调节能力后的约束。文献[12-16]同样基于一致性理论提出源-荷功率协调控制策略,但仍需中心控制器集中设置“功率调整项”或“功率初始参考”指令,具有一定的局限性。

另外,已有文献围绕多组储能或换流站^[17-19]间的功率平衡展开研究。例如文献[20-23]从储能荷电状态和输出功率角度研究了多组分布式储能的经济分配,而较少关注分布式电源自身间的功率均衡,其主要原因是光伏等分布式电源具有随机性和间歇性特点,出力预测效果有限,通过智能算法等预测出力然后下达指令,过于依赖通信手段。下垂控制策略^[24-26]可在一定程度上实现并联单元的功率均衡,但降低了母线电压调整率精度。在无法精确预测各单元出力且对通信要求不高的前提下,如何保证系统中多组分布式电源在各种场景下利用率均衡,避免部分电源长期重载或过载,从而提高装备可靠性,仍是亟须解决的问题。

针对上述问题,文中以实现功率平衡和多组分布式电源间的功率分配为研究目标,基于一致性理论提出一种功率自适应协调控制策略。该策略依靠邻近节点间通信,通过相邻信息交换迭代,多组分布式电源可自适应更新运行状态以平抑系统内功率波动,兼顾实时调度等特性,且在无须预测光伏出力的前提下,可实现多组分布式光伏的精准功率分配。一致性理论可降低对通信的需求,并提高通信故障等时控制策略的可靠性。多种场景下的仿真验证了所提控制策略的有效性和可靠性。

1 直流配网结构与控制思路

图1给出了典型的含多组分布式电源接入的直流配网结构,可通过换流站或直流变压器连接到交流网或其他直流电网,实现区域间功率互济和功率

收稿日期:2022-11-18;修回日期:2023-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51922028)

支撑等目标。考虑到孤岛运行,通常还须配备储能等单元以平衡光伏功率波动。随着越来越多的分布式电源的接入,主动协调各单元的运行状态以提高系统的自治能力将有利于直流配网的稳定高效运行。

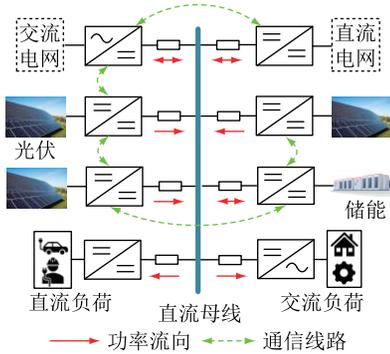


图1 多源直流配网结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-source DC distribution network structure

图1中,红色实线箭头表示系统内功率流向,绿色虚线箭头表示所提控制策略各节点间通信线路。基于只需相邻节点信息的一致性理论,系统内各组光伏、换流站、储能等供电单元均可被看作相同节点,就近交换电压或电流信息,进而自适应调节运行状态。根据上层调度指令或者储能的实时运行状态需求,换流站或储能的实际功率和需求功率之间可能产生一定偏差,所提控制策略的基本思想就是通过任意相邻节点间的状态变量信息交换,使得储能光伏等其他分布式电源可自适应更新运行状态,主动消纳系统内功率偏差,有效响应上层调度指令和实现储能最优控制,充分调动多组分布式电源自身调节能力以平抑功率波动,同时无须集中获取其状态信息或预测分布式电源出力条件下,始终保证其利用率的均衡。

2 自适应功率协调控制策略原理与实现

由上文分析可知,自适应功率协调控制策略的原理为在同步控制脉冲的作用下,系统中储能、光伏及换流站等节点间就近交换信息,然后进入一致性通信迭代,各节点的状态变量将逐渐一致于状态变量初始值的平均值,从而各节点更新运行状态指令。依据地理位置,通常采用图2所示的环形通信拓扑,下文将具体解释控制策略原理与实现。

2.1 一致性理论

一致性理论是一种近年来被广泛应用于电力系统的分布式控制策略^[11-14,27-30],此处仅简要归纳并介绍结论,理论推导省略。系统中每个单元都可

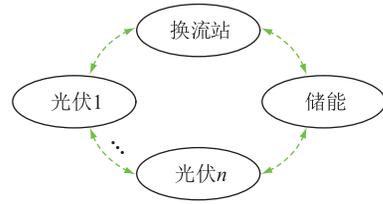


图2 通信拓扑

Fig.2 Topology of communication

以被看作一个节点,一个节点可以包括一个或多个状态变量 x_i 。同步各节点的脉冲周期后,通过逐次通信迭代,每个节点可获得某个状态变量全局初始值的平均值,基本理论公式可以表示为:

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

式中: $x_i[k+1]$ 为节点 i 第 $k+1$ 次迭代的状态变量; $x_j[k]$ 为节点 j 第 k 次迭代的状态变量; w_{ij} 为节点 i 和节点 j 间的权重系数; n 为节点的个数。式(1)写成矩阵形式即为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{W}\mathbf{X}(k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(k+1)$ 、 $\mathbf{X}(k)$ 分别为第 $k+1$ 次迭代与第 k 次迭代的状态矩阵; \mathbf{W} 为权重矩阵。

综合考虑收敛精度和稳定性,涉及一致性理论的研究多选用中心算法(metropolis algorithm, MA)来构造 \mathbf{W} ,可以表示为:

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\max(l_{ii}, l_{jj}) + 1} & j \in N_i \\ 1 - \sum_{d=1, d \in N_i}^n \frac{1}{\max(l_{ii}, l_{dd}) + 1} & j = i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: N_i 为与节点 i 相连的邻居节点集合; l_{ii} 、 l_{jj} 分别为拉普拉斯矩阵 L 的 i 行 i 列与 j 行 j 列的元素, $L = D - A$ 。其中, A 为表示节点连接关系的邻接矩阵, a_{ij} 为 A 的 i 行 j 列元素,当节点 i 和节点 j 相邻, a_{ij} 为 1,否则为 0; D 为度矩阵, d_{ii} 为 D 的 i 行 i 列元素,表示节点 i 相邻节点的个数。

2.2 控制策略实现

图1结构中各节点的控制策略流程如图3所示。首先各节点根据其运行状态确定自身状态变量的初值;接着在同步时钟脉冲的作用下进入一致性迭代,发送和接受状态变量迭代值,各节点的状态变量逐渐一致于初值的平均值;然后各节点本地控制器据此计算并更新运行指令,并保持该指令直到下一次更新;最后判断是否退出或进入下一计算周期。

根据运行场景和控制需求,控制目标可以概括为以下三方面:(1)平抑因光照不均等因素引起的

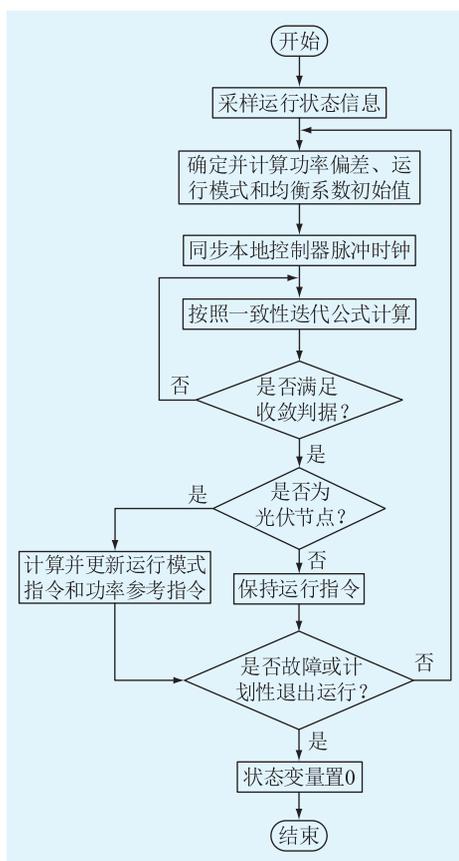


图3 各节点控制流程

Fig.3 Control flow chart of each node

功率波动;(2)有效实时响应上层调度需求;(3)保证各组分布式光伏的利用率在所有场景下的均衡,选取了3组控制变量,即功率偏差、运行模式和均衡系数。具体实现步骤如下:

(1) 确定状态变量初始值。在并网和离网状态下,换流站和储能等均存在某一最佳功率交换大小,例如考虑到调度需求,换流站存在上层调度需求功率 $P_{vsc,ref}$,定义向电网反馈能量为负,从电网向直流配网注入功率为正,由此产生实际功率和最佳功率曲线间功率偏差,此功率偏差即为需要分布式光伏等主动调节消纳的功率偏差。而光伏为即发即用单元,通过协调工作在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式和定功率模式以满足负荷、调度和储能充放需求等。光伏节点不存在功率偏差,因此各单元的初始功率状态变量如式(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{vsc} = P_{vsc} - P_{vsc,ref} \\ \Delta P_{bat} = P_{bat} - P_{bat,ref} \\ \Delta P_{pv,i} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ΔP_{vsc} 、 ΔP_{bat} 、 $\Delta P_{pv,i}$ 分别为换流站、储能和光伏 i 的功率偏差初始值; P_{vsc} 、 P_{bat} 分别为换流站、储能的初始功率; $P_{bat,ref}$ 为储能在某一状态下与外界最佳的

交换功率。

运行模式状态变量初值只须考虑光伏,即:

$$\begin{cases} M_{vsc} = 0 \\ M_{pv,i} = \begin{cases} 1 & \text{MPPT 模式} \\ 0 & \text{定功率模式} \end{cases} \\ M_{bat} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: M_{vsc} 、 $M_{pv,i}$ 、 M_{bat} 分别为换流站运行模式状态变量初始值、光伏 i 运行模式状态变量初始值和储能运行模式状态变量初始值。

各组光伏须自适应切换运行指令以保证功率平衡,然而考虑到其随机性、间歇性特点,已有研究不能保证各组光伏间功率的合理分配。由于光伏变换器的设计由光伏出力额定功率决定,变换器重载或过载将影响其寿命和可靠性,因此光伏出力须均衡。定义光伏利用率为:

$$r_i = P_{pv,i} / P_{N,i} \quad (6)$$

式中: r_i 为光伏 i 的利用率; $P_{pv,i}$ 为光伏 i 的输出功率; $P_{N,i}$ 为光伏 i 的额定输出功率。

当各组光伏光照充足时,各组光伏可以按照额定容量比例承担相应的功率,然而当个别光伏出力不足时,该组光伏应首先切换到 MPPT 模式,此时出力充足的其他光伏应按照新的额定容量比例承担功率,因此利用率信息还应考虑各组光伏本身的运行模式。在利用率的基础上,进一步定义均衡系数的概念。

$$e_i = (1 - M_{pv,i}) r_i \quad (7)$$

式中: e_i 为节点 i 的均衡系数。

式(7)中,当光伏工作在 MPPT 模式,即 $M_{pv,i}$ 为 1 时,说明该组光伏已经最大程度出力,因此无须考虑其承担功率是否合理,此时均衡系数为 0;当光伏的 $M_{pv,i}$ 为 0 时,说明该组光伏仍有功率裕度,可以进一步调节出力以实现功率合理分配,因此均衡系数 e_i 就是利用率 r_i 。综上可得,均衡系数状态变量初值为:

$$\begin{cases} e_{vsc} = 0 \\ e_{pv,i} = (1 - M_{pv,i}) r_i \\ e_{bat} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: e_{vsc} 、 $e_{pv,i}$ 、 e_{bat} 分别为换流站均衡系数状态变量初始值、光伏 i 均衡系数状态变量初始值和储能均衡系数状态变量初始值。

(2) 一致性通信迭代。由于不同供电单元间的通信方式完全相同,在保证连通性的前提下,系统内不同单元或新增单元均可以和任意单元构成通信线路。当系统内有单元要退出检修或故障时,只须把功率状态变量初值置于 0,无需其他操作。

各供电单元根据自身状态确定状态变量初始值,然后根据不同节点间的连接关系,按照式(3)计算得到权重迭代矩阵 \mathbf{W} ,最后按照式(1)和式(2)所示的迭代公式进行计算,各节点的状态变量将逐渐一致于功率状态变量初值的平均值,即:

$$\Delta P_{\text{avg}} = \frac{\Delta P_{\text{vsc}} + \Delta P_{\text{bat}}}{n + 2} \quad (9)$$

$$M_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{\text{pv},i} + M_{\text{vsc}} + M_{\text{bat}}}{n + 2} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{\text{pv},i}}{n + 2} \quad (10)$$

$$e_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n e_{\text{pv},i} + e_{\text{vsc}} + e_{\text{bat}}}{n + 2} = \frac{\sum_{i=1}^n e_{\text{pv},i}}{n + 2} \quad (11)$$

式中: ΔP_{avg} 、 M_{avg} 、 e_{avg} 分别为功率偏差、运行模式和利用系数初值的平均值。

(3) 光伏更新运行指令。此时, $(n+2)\Delta P_{\text{avg}}$ 即为需要所有光伏消纳的功率偏差之和; $(n+2)\Delta P_{\text{avg}}$ 在并网和离网模式下亦分别对应 ΔP_{vsc} 和 ΔP_{bat} ; $(n+2)M_{\text{avg}}$ 即为工作在 MPPT 模式的光伏的个数,则 $n-(n+2)M_{\text{avg}}$ 为工作在定功率模式的光伏的个数; $(n+2)e_{\text{avg}}$ 为工作在定功率模式的光伏利用率之和。因为 MPPT 模式下的光伏已经失去调节能力,所以此时定功率模式下的光伏的期望平均利用率,即剩余光伏所能达到的平均利用率 e_{ideal} 为:

$$e_{\text{ideal}} = \frac{(n + 2)e_{\text{avg}}}{n - (n + 2)M_{\text{avg}}} \quad (12)$$

因此功率参考指令更新为:

$$P_{\text{ref},i} = P_{\text{pv},i} + (n + 2)\Delta P_{\text{avg}} \frac{P_{N,i}}{\sum_{i=1}^n P_{N,i}} + P_{\text{uneven}}(1 - M_i)(e_{\text{ideal}} - r_i) \quad (13)$$

式中: P_{uneven} 为系统允许的最大不平衡功率;等号右侧第 2 项为消除功率偏差部分;等号右侧第 3 项为消除利用率偏差部分。

对于式(13),若光伏工作在定功率模式,则当光伏的利用率小于平均利用率时则提高输出功率,当大于平均利用率时就降低输出,最后定功率模式下的光伏利用率将趋于一致,即 $e_{\text{ideal}} - r_i$ 趋于 0,从而始终保证系统内仍有调节能力的光伏的利用率均衡。

式(13)能够实现利用率均衡的前提是没有功率裕度的光伏可自适应切换到 MPPT 模式,因此光伏的运行模式 M 也应随之更新:

$$M_{\text{pv},i} = \begin{cases} 1 & r_i < 0.95e_{\text{avg}} \\ 0 & r_i \geq 0.95e_{\text{avg}} \end{cases} \quad (14)$$

对于式(14),当任一单元的利用率始终小于利用率平均值,则说明该单元已经失去调节能力,因此须切换到 MPPT 模式。在母线电压允许偏差范围内,设置任一单元的利用率始终大于 0.95 倍利用率平均值时,即说明该单元仍具有一定的功率裕度,可以协调工作在定功率模式。同时,当系统内所有光伏最大出力也小于需求时,所有光伏应全部切换到 MPPT 模式,而此时 e_{avg} 为 0,无法根据式(14)切换,因此当 $(n+2)\Delta P_{\text{avg}}$ 较大时,运行模式 M 也应切换为 1。

$$M_{\text{pv},i} = 1 \quad (n + 2)\Delta P_{\text{avg}} > P_{\text{uneven}} \quad (15)$$

因此可以得到考虑均衡系数时光伏运行模式切换策略:

$$M_{\text{pv},i} = \begin{cases} 1 & r_i < 0.95e_{\text{avg}} \text{ 且 } (n + 2)\Delta P_{\text{avg}} > P_{\text{uneven}} \\ 0 & r_i \geq 0.95e_{\text{avg}} \end{cases} \quad (16)$$

综上所述,通过相邻单元间的通信,可以在充分考虑调度需求和储能最优控制的前提下,实现并网和离网状态下的功率自治。当分布式光伏和负荷输出随机波动时,无须对出力进行预测,仅通过相邻通信,各组光伏即可以自适应切换运行模式并始终保持利用率的均衡。由于不同供电单元间的通信内容完全相同,控制策略的灵活性和可扩展性也较高。

3 仿真分析

为了验证所提策略的有效性,文中在 Matlab/Simulink 中搭建了由换流站、储能和 4 组光伏 (PV1—PV4) 组成的仿真模型。储能最大充电功率取 -200 kW,4 个光伏额定光照强度均为 1 000 W/m²,额定容量分别设为 500、200、200、200 kW,系统允许的最大不平衡功率 P_{uneven} 取额定总功率的 5%,即 55 kW。设置迭代通信周期为 2 ms。

仿真时间设为 25 s,1 s 后加入所提控制策略。为展示清晰同时充分体现控制策略的有效性,负荷功率随机突变,0 s—10 s 时段为 800 kW,10 s—23 s 时段为 900 kW,23 s—25 s 时段跳变到 1 300 kW,不同光伏光照强度按照图 4 所示随机变化。

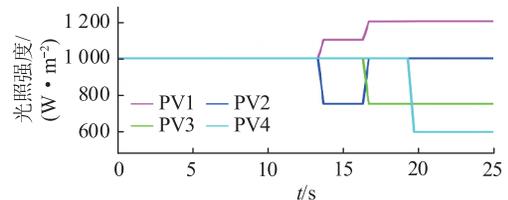


图 4 光照强度波动曲线

Fig.4 Fluctuation curves of sunlight intensity

3.1 自适应功率协调控制策略

3.1.1 并网模式

并网模式下为验证控制策略整体的有效性,换流站的上层调度指令如图 5 所示,图 6 为并网模式下仿真结果。

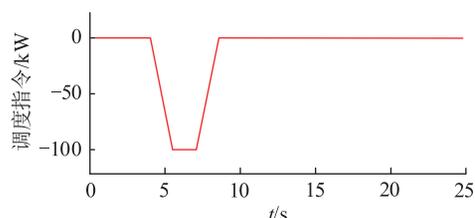
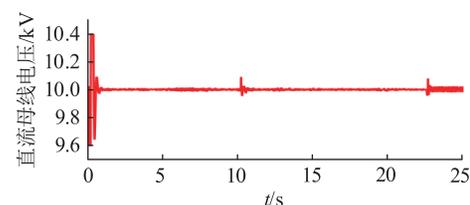
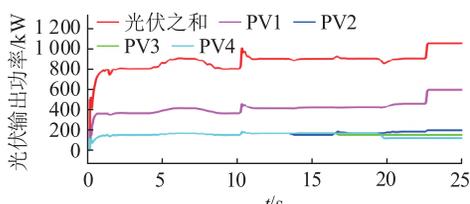


图 5 换流站调度指令

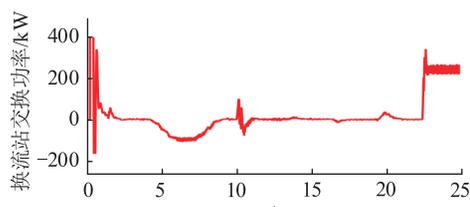
Fig.5 Dispatch order of VSC



(a) 母线电压变化



(b) 光伏功率变化



(c) 换流站功率变化

图 6 并网时仿真结果

Fig.6 Simulation results of on-grid operation

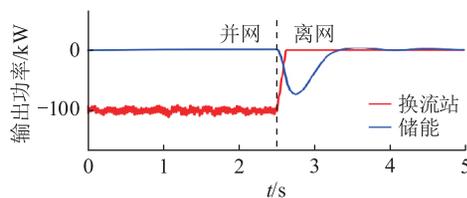
由图 6(a) 和图 6(b) 可知,当光伏输出和负荷随机波动时,各组光伏可以自适应调节出力,始终保持系统内功率平衡,直流母线电压被较好地控制在额定值。图 6(c) 的换流站功率变化曲线也显示,在平抑功率波动的同时,换流站可以有效地响应上层调度指令,换流站功率曲线基本符合调度功率曲线,直至 23 s 后,当所有光伏出力小于功率总需求时,换流站才参与功率平衡,充分挖掘了光伏自身调节能力,也减小了换流站的压力。

离网状态下,储能控制母线电压,同时可按照其最优功率充放电,其效果即等效为换流站根据调度需求向系统注入和吸收功率,原理和效果类似,

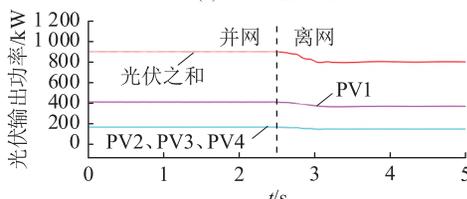
具体不再展示。

3.1.2 并离网切换

为验证并离网切换时控制策略的有效性,仿真中设置在 2.5 s 之前并网运行,换流站按照 -100 kW 的调度指令向上反馈功率,在 2.5 s 时,换流站因为故障或计划性孤岛运行,储能控制母线电压,储能目标功率 $P_{bat,ref}$ 设置为 0。当换流站或储能退出时,只要把所有状态变量置 0,无需其他操作。图 7 为该条件下的运行状态变化曲线,可以看到,换流站功率由 -100 kW 降为 0,光伏总输出由 900 kW 也逐渐降至 800 kW,储能在缓冲暂态的功率波动后,功率也趋于 0,符合预设。切换过程中也没有产生较大的功率波动,能够较为平稳地实现并离网切换。



(a) 母线电压变化



(b) 光伏功率变化

图 7 并离网切换运行状态

Fig.7 Operation state of switching between on-grid mode and islanding mode

3.2 考虑均衡系数前后的效果对比

为了进一步验证文中所提的均衡系数状态变量的控制效果,接下来从利用率和运行模式两方面分别作对比。

3.2.1 利用率效果对比

图 8 为离网模式下不考虑均衡系数和考虑均衡系数的利用率对比结果。图 8(a) 显示尽管已经按照光伏额定容量比例分配功率偏差,但不同光伏间动态性能的差异仍然造成利用率的不均。考虑均衡系数后,图 8(b) 的利用率曲线明显收敛,实现了所有可能的情况下利用率的一致。以 15 s 左右状态为例,此时系统内功率总需求为 900 kW,按照容量比例光伏 2 应承担的功率为 163.6 kW,然而此时光伏 2 的光照不足,允许最大输出仅为 150 kW,因此切换到 MPPT 模式,其他光伏自适应补偿相应的功率仍可保持利用率均衡。其他时刻不再赘述。

3.2.2 运行模式效果对比

图 9 为考虑均衡系数前后的运行模式变化情

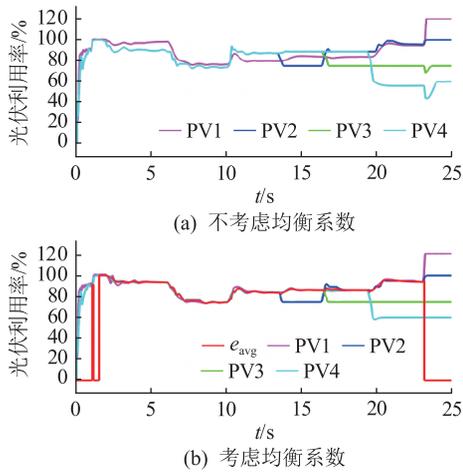


图8 利用率运行状态曲线

Fig.8 Operation curves of the ratio of utilization

况。考虑均衡系数后,当该光伏的最大允许出力不足以支撑其按照额定容量比例承担功率时,该光伏将自动切换到 MPPT 模式,也证明了模式切换策略的有效性。

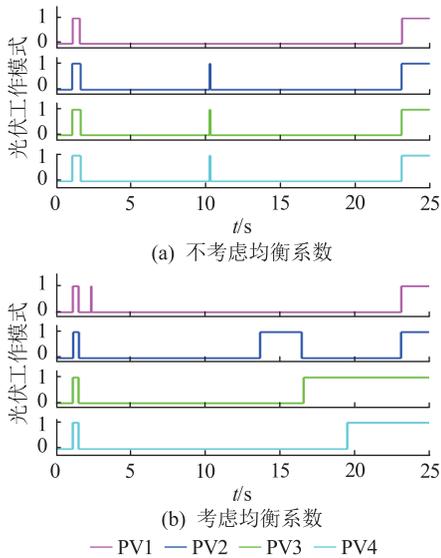


图9 光伏运行模式状态曲线

Fig.9 Curves of operation mode of PVs

3.3 算法自适应性及随机投退性能

实际应用中,考虑到供电单元的故障、维护、检修等要求,控制策略须满足即插即用和随机投退的特性。现有的基于一致性的算法在面临投退时往往都须更新通信线路或权重矩阵,仍然须控制“中心”来匹配新的状态,并不是真正的“分布式”。文中所提控制策略的不同单元间通信和控制方式完全相同,当光伏退出时,只要把运行模式置 1,其他状态变量均置 0,无需其他任何操作,其他单元仍可自适应工作在新的运行状态。

仿真中设置储能工作在浮动状态,负荷 800

kW,5.5 s 时光伏 4 退出,7.5 s 时又投入。0 s—10 s 的仿真波形如图 10 所示。图 10(a)和图 10(b)显示,当光伏随机退出和投入时,系统依然可以保证功率平衡,各单元仍能自适应过渡到新的状态,同时保证利用率的均衡;图 10(c)表明储能快速响应暂态功率波动后又能回到浮动工作状态,验证了控制策略具有随机投退的特性。

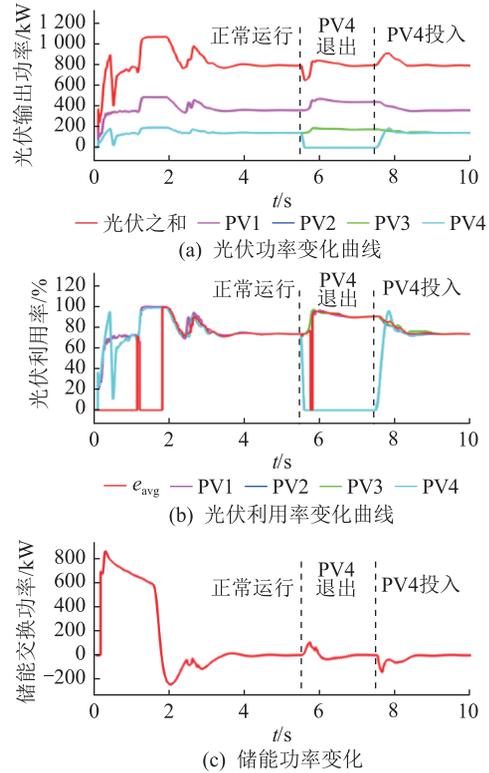


图10 运行状态曲线

Fig.10 Operation curves

3.4 单点通信线路故障

当系统中出现通信故障等问题时,只要系统仍不失连通性,即任一节点仍能通过邻节点连接到其他任意节点,算法仍能收敛,具有较强的可靠性^[11-14,24-25]。仿真中设置 15 s 时光伏 1 和光伏 2 之间的通信线路故障,当节点接收不到相邻节点信息时,只须将对应故障端的节点迭代权重叠加到自身节点权重上,无须集中重新配置 W 。

图 11 为通信单点故障时的仿真波形。从图 11(a)和图 11(b)可以看到,出现通信故障后,系统仍能保持功率平衡和光伏利用率的均衡。在发生故障瞬间,由于已经进入稳态,储能功率趋于 0,利用率也均衡,因此故障瞬间并没有出现功率波动;但当光伏输出和负荷波动时,暂态过程波动更大。图 11(c)和图 11(d)也证明了单点通信线路出现故障时,所需收敛时间也更长,因此到达稳态的时间也越长,这也与相关一致性算法的理论部分相符合,

不过都不影响算法的有效性。当通信出现延迟时,影响和通信故障时类似,此处不再展示仿真说明。

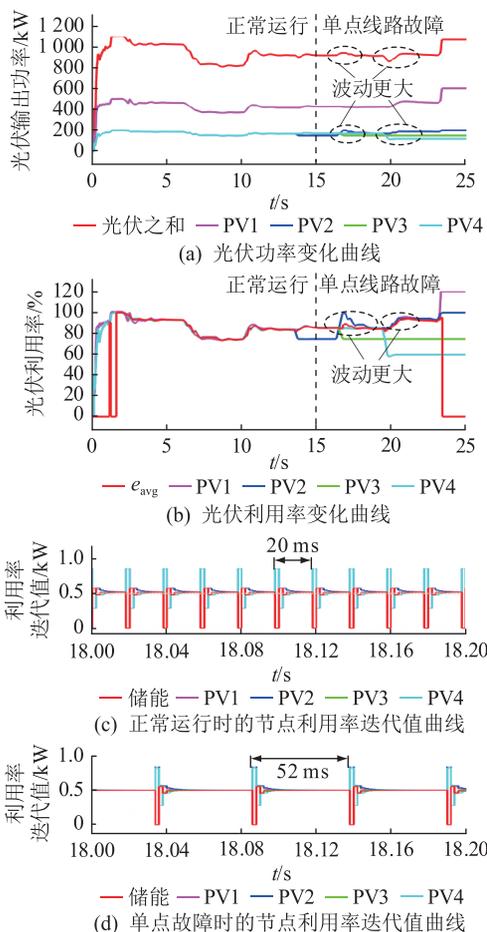


图 11 正常运行和单点故障时运行状态曲线

Fig.11 Operation curves under normal operation and single communication failure

4 结论

以考虑功率均衡和调度需求为研究背景,提出一种含多组分布式光伏接入的完全分布式的自适应功率协调控制策略:

(1) 通过邻节点间的信息交换,多组分布式电源可自适应更新运行状态以实时平抑系统内功率波动,兼顾实时调度与储能最优功率管理等需求,实现整体功率自治。

(2) 充分考虑了分布式光伏间歇性和随机性特点,通过运行模式和均衡系数的配合,不必预测出力,可以保证多组分布式电源在所有运行场景下功率精准分配和利用率的均衡。

(3) 不同供电单元间通信内容和计算方式相同,无需中心控制器,系统内控制单元具有随机退的特性,可扩展性和灵活性较强。

(4) 多种运行场景和条件下的仿真结果验证了所提策略的有效性和可靠性。

以多光伏为例给出了一种功率自适应协调控制策略,当系统中有多组储能或换流站时,同样可基于储能的荷电状态等信息定义储能的运行模式及功率偏差状态变量,效果类似,但具体算法仍有待进一步优化。

参考文献:

- [1] 刘飞,熊晓琪,查鹏程,等. 直流配电网网架结构与分布式光伏多目标协同优化[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):3754-3765.
LIU Fei, XIONG Xiaoqi, ZHA Pengcheng, et al. Multi-objective collaborative optimization for DC distribution network configuration and distributed photovoltaic[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12):3754-3765.
- [2] 石榴,廖凯,杨健维,等. 计及系统延迟的直流微电网经济运行控制策略[J]. 电网技术,2022,46(1):138-145.
SHI Liu, LIAO Kai, YANG Jianwei, et al. Distributed economic optimal operation control strategy for islanded DC microgrids considering system delay[J]. Power System Technology, 2022, 46(1):138-145.
- [3] 周凌志,任永峰,陈麒同,等. 新型主从控制微电网运行控制策略研究[J]. 可再生能源,2021,39(8):1100-1106.
ZHOU Lingzhi, REN Yongfeng, CHEN Qitong, et al. Operation control strategy of new master-slave control for microgrid[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(8):1100-1106.
- [4] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6791-6801,7114.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6791-6801,7114.
- [5] 吴在军,谢兴峰,杨景刚,等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. 电力工程技术,2021,40(2):59-67.
WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2):59-67.
- [6] 任勇,曾鸣. 独立光储直流微网的稳定运行控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(22):75-86.
REN Yong, ZENG Ming. Stable operation control strategy for an independent DC microgrid with photovoltaics and a storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22):75-86.
- [7] 刘海涛,熊雄,季宇,等. 直流配电系统不同运行模式下扁平化管理与协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(S1):37-46.
LIU Haitao, XIONG Xiong, JI Yu, et al. Research on power flat management and coordinated control strategy under different operation modes for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1):37-46.
- [8] 林其友,蒋文良,李媛媛,等. 基于母线电压分层的直流微电网系统协调控制[J]. 中国电力,2022,55(2):166-171,180.
LIN Qiyu, JIANG Wenliang, LI Yuanyuan, et al. Coordinated

- control of DC microgrid system based on bus voltage stratification[J]. *Electric Power*, 2022, 55(2):166-171, 180.
- [9] 潘鹏鹏,陈武,侯凯,等. 中低压直流配电系统的分散式统一控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(23):72-80.
PAN Pengpeng, CHEN Wu, HOU Kai, et al. Decentralized unified control strategy for medium- and low-voltage DC power distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23):72-80.
- [10] 张继红,赵锐,高雷,等. 直流微网母线电压稳定控制策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(12):4922-4929.
ZHANG Jihong, ZHAO Rui, GAO Lei, et al. DC bus voltage stability control strategy for DC microgrid[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12):4922-4929.
- [11] 边晓燕,孙明琦,赵健,等. 基于一致性算法的源-荷协同分布式优化调控策略[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4):1334-1347, 1540.
BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, ZHAO Jian, et al. Distributed coordinative optimal dispatch and control of source and load based on consensus algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4):1334-1347, 1540.
- [12] 徐熙林,宋依群,姚良忠,等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(一):基于一致性理论的分布式协调控制系统建模[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10):2841-2848, 3135.
XU Xilin, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Source-load-storage distributed coordinative optimization of AND (part I): consensus based distributed coordination system modeling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10):2841-2848, 3135.
- [13] 徐熙林,宋依群,姚良忠,等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(二):考虑非理想遥测环境的一致性算法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(11):3244-3254.
XU Xilin, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Source-load-storage distributed coordinative optimization of ADN (part II): consensus algorithm considering non-ideal telemetering network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(11):3244-3254.
- [14] 汤茂东,曲小慧,姚若玉,等. 基于离散一致性算法的直流配电网多光伏协调控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(24):89-95.
TANG Maodong, QU Xiaohui, YAO Ruoyu, et al. Multi-photovoltaic coordinated control strategy in DC distribution network based on discrete consensus algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(24):89-95.
- [15] 陈景文,刘嘉欣,张文倩. 基于一致性算法的直流微网多储能 SoC 均衡策略[J]. *智慧电力*, 2022, 50(9):30-38.
CHEN Jingwen, LIU Jiaxin, ZHANG Wenqian. State of charge equalization strategy of multi-energy storage in DC microgrid based on consensus algorithm[J]. *Smart Power*, 2022, 50(9):30-38.
- [16] 龙本锦,张靖,何宇,等. 基于 DMPC 和储能单元约束的分组一致性控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24):23-36.
LONG Benjin, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Grouping consistency control strategy based on DMPC and energy storage unit constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24):23-36.
- [17] 梅念,苑宾,李探,等. 接入孤岛新能源电场的双极柔直换流站控制策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(11):3575-3582.
MEI Nian, YUAN Bin, LI Tan, et al. Study on control strategy of bipolar VSC station connected to islanded renewable power plant[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(11):3575-3582.
- [18] 王超,胡浩,郑炼,等. 基于智慧蓄电池的光伏储能系统及其控制策略[J]. *可再生能源*, 2022, 40(4):506-512.
WANG Chao, HU Hao, ZHENG Lian, et al. Photovoltaic energy storage system based on smart battery and its control strategy[J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(4):506-512.
- [19] 王炳辉,黄天啸,吴涛,等. MMC 柔性直流换流站无功级联控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(5):137-142.
WANG Binghui, HUANG Tianxiao, WU Tao, et al. Reactive cascaded control strategy of MMC flexible DC converter station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(5):137-142.
- [20] 刘晖,雷勇,朱英伟,等. 微电网运行模式切换下储能变流器双无源控制策略[J]. *中国电力*, 2022, 55(1):196-202.
LIU Hui, LEI Yong, ZHU Yingwei, et al. Dual-passivity-based control strategy for energy storage converter under microgrid operation mode switching[J]. *Electric Power*, 2022, 55(1):196-202.
- [21] 张步云,王晋宁,梁定康,等. 采用一致性算法的自治微电网群分布式储能优化控制策略[J]. *电网技术*, 2020, 44(5):1705-1713.
ZHANG Buyun, WANG Jinning, LIANG Dingkang, et al. Optimization control strategy of distributed energy storage in autonomous microgrid cluster on consensus algorithm[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5):1705-1713.
- [22] 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, 369.
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, 369.
- [23] 张晓花,王晓亮,廖重阳,等. 基于一致性算法的储能单元分布式优化调度策略[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(3):41-46.
ZHANG Xiaohua, WANG Xiaoliang, LIAO Chongyang, et al. Distributed scheduling strategy of energy storage unit based on consensus algorithm[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(3):41-46.
- [24] 张勤进,庄绪州,刘彦呈,等. 基于线路阻抗补偿的直流微源并联均流控制策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(5):1912-1921.

- ZHANG Qinjin, ZHUANG Xuzhou, LIU Yancheng, et al. Current sharing control strategy of parallel DC micro-sources based on line impedance compensation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5):1912-1921.
- [25] 魏星, 朱信舜, 葛健, 等. 级联型电力电子变压器并联运行的改进下垂控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(4):1274-1282.
- WEI Xing, ZHU Xinshun, GE Jian, et al. Improved droop control strategy for parallel operation of cascaded power electronic transformers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4):1274-1282.
- [26] 张继红, 宋广宇, 熊伟, 等. 基于虚拟复阻抗的增强型鲁棒电压下垂控制方法及环流抑制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12):401-409.
- ZHANG Jihong, SONG Guangyu, XIONG Wei, et al. Enhanced robust voltage droop control method and circulating current suppression strategy based on virtual complex impedance[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(12):401-409.
- [27] 陆瑶, 王杰, 王子强, 等. 基于固定时间一致性算法的孤岛微电网分布式容错二次控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11):17-24.
- LU Yao, WANG Jie, WANG Ziqiang, et al. Distributed fault-tolerant secondary control strategy for islanded microgrid based on fixed-time consistency algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11):17-24.
- [28] 米阳, 彭建伟, 陈博洋, 等. 基于一致性原理和梯度下降法的微电网完全分布式优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15):1-11.
- MI Yang, PENG Jianwei, CHEN Boyang, et al. Fully distributed optimal dispatch of a microgrid based on consensus principle and gradient descent[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15):1-11.
- [29] 曾浩, 赵恩盛, 周思宇, 等. 基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12):12-21.
- ZENG Hao, ZHAO Ensheng, ZHOU Siyu, et al. Adaptive droop control of a DC microgrid based on current consistency[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12):12-21.
- [30] 林丽娟, 贾清泉, 田书娅, 等. 基于一致性算法的配电网谐波分布式治理策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2):109-117.
- LIN Lijuan, JIA Qingquan, TIAN Shuya, et al. Distributed harmonic mitigation strategy of distribution network based on consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2):109-117.

作者简介:



李付强

李付强(1977),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统分析与运行控制、电力规划设计工作(E-mail:lfqbb@163.com);

汤茂东(1995),男,硕士,研究方向为有源直流配网运行控制;

曲小慧(1981),女,博士,教授,研究方向为电力电子及其应用技术、直流配电系统。

An adaptive power control strategy in multi-source DC distribution networks based on consensus theory

LI Fuqiang¹, TANG Maodong², QU Xiaohui², CHEN Wu², DONG Ye¹, PAN Yan¹

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To realize power dispatch and equilibrium in DC distribution networks, a distributed adaptive coordinated control strategy is proposed. Based on the consistency theory, photovoltaics, energy storage and other units in the network can be considered as the same nodes involved in control, where power deviation and equalization coefficient are chosen as state variables in each node. By the interaction and iteration among adjacent nodes, each node can adaptively adjust the operation state according to the dispatching command. On the premise of effectively accepting the real-time dispatching command and optimal control of energy storage, the regulation ability of distributed power supply is fully utilized to suppress the power imbalance of internal load in the system. Meanwhile, the power provided by each distributed source is proportional to its rated capacity under different operating scenarios by adjusting the power reference, and the prediction the output of each distributed sources is not required. When each individual distributed power supply loses its adjustment ability, the balance of utilization rate of other units can still be ensured. Simulation results under various scenarios verify the effectiveness of the proposed strategy.

Keywords: DC distribution network; distributed sources; distributed control; consensus theory; power distribution; dispatching command

(编辑 钱悦)