

分布式储能集群的主被动协调控制方法

徐旻,袁航,曾海建,张明敏

(江苏怡宁能源实业集团有限公司,江苏 盐城 224000)

摘要:随着新型配电网的高速发展,接入了越来越多的分布式电源、电动汽车、光伏等波动性元件。因此需要广泛地构建分布式储能系统,从而保障配用电安全可靠运行。但大量分布式储能成本颇高、运维繁琐、调控困难,尤其在微电网应用场景下难以得到大电网有力支撑,因此针对微电网应用场景,提出了一种微电网分布式储能集群的调控方法。首先,提出一种内置不同目标策略的储能单元充放电控制方法,在保障充放电安全的情况下,根据储能状态与需求,实现自适应调节;其次,提出了一种通信缺失情况下,通过内置控制策略使多个储能单元具备被动的协同能力的方法;在通信支持下,多个储能单元具备更优的主动的协同能力。仿真分析表明,采用该方法可在微电网架构下,在通信缺失情况下仍可有效支撑电网与微电网安全运行,通信满足情况下可进一步提升电网与微电网的运行效果。

关键词:分布式储能;主被动协调控制;协同策略;通信缺失

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26581

Research on Active and Passive Coordinated Control Methods for Distributed Energy Storage Clusters

XU Yang, YUAN Hang, ZENG Haijian, ZHANG Mingmin

(Jiangsu Yining Energy Industry Group Co., Ltd., Yancheng 224000, Jiangsu, China)

Abstract: With the rapid development of new distribution networks, an increasing number of fluctuating components such as distributed generation, electric vehicles, and photovoltaic systems are being integrated. This necessitates the widespread deployment of distributed energy storage systems to ensure the secure and reliable operation of power distribution and consumption. However, large-scale distributed energy storage entails high costs, complex operation and maintenance, and difficult control, especially in microgrid applications where strong support from the main grid is often unavailable. Therefore, a control method for distributed energy storage clusters in microgrids, specifically targeting microgrid application scenarios was proposed. Firstly, an energy storage unit charging/discharging control method was proposed. This method incorporated different objective strategies, enabling adaptive regulation based on the state of charge and demand while ensuring charging/discharging safety. Secondly, a method was presented that allows multiple energy storage units to achieve passive coordination capability through embedded control strategies even in the absence of communication. Furthermore, with communication support, multiple units can achieve superior active coordination capability. Simulation analysis shows that using this method can effectively support the secure operation of both the main grid and the microgrid under a microgrid architecture, even when communication is lacking, when communication is available, it can further enhance the operational performance of the grid and microgrid.

Key words: distributed energy storage; active and passive coordination control; coordination strategy; absence of communication

随着全球能源转型的加速、配电网的高速发展与智能化程度的提升,越来越多的分布式电源^[1] (distributed generation, DG) 和电动汽车^[2] (electric vehicles, EVs)等具有波动特性的元件接

入电网。这种接入模式不仅增强了可再生能源^[3]的利用率,同时也对电网的安全、稳定运行提出了新的挑战。特别是这些分布式能源的间歇性和随机性^[4],会导致电网波动,增加电网调度和管

基金项目:国网江苏省电力有限公司省管产业2024年科技项目(JC2024040)

作者简介:徐旻(1993—),男,本科,主要研究方向为新能源及分布式电源并网,Email:412905882@qq.com

理的复杂性。因此,构建基于分布式储能技术的微电网^[5]已成为应对这一问题的有效方案之一。

微电网通过集成分布式能源、储能设备^[6]及智能控制系统,具备更强的灵活性和自适应能力,能够在与主电网并网^[7]或孤岛运行^[8]时有效保障电网的安全性和供电可靠性。然而,尽管分布式储能技术为微电网的高效运行提供了技术保障,但其高昂的建设与维护成本^[9]、复杂的调度控制^[10]以及潜在的通信失效问题^[11],依然是亟待解决的瓶颈。

鉴于此,本文提出一种在微电网架构下高效可靠利用储能设备的方法。首先,设计了一种基于多目标策略的储能单元充放电控制方法,以保证充放电过程的安全性,并具备自适应特性。其次,针对通信缺失情况下的储能单元调控难题,提出了通过内置控制策略实现多个储能单元被动协同的方案,以保证微电网在通信中断时的稳定运行。在有通信支持的情况下,进一步提出了主动协同控制策略,以提升系统的整体运行效果。

通过仿真分析验证,该方法在通信缺失情况下,能够有效支撑电网和微电网的安全运行;在通信满足条件下,进一步提高了电网与微电网的协同调控能力与运行效率。这为解决当前分布式储能系统中存在的高成本、难调度等问题提供了新的思路与实践依据。

1 储能直流微电网结构与控制方法

1.1 微电网基本结构与运行方式

微电网是一种小型的局部电力系统,通常由分布式电源、储能装置、电力电子装置以及通信设备组成。微电网基本结构如图1所示。

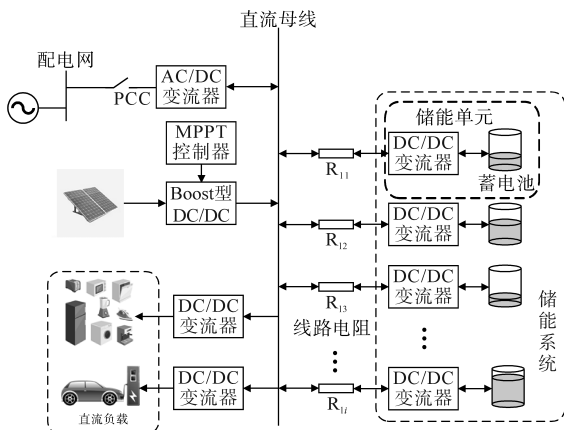


图1 微电网基本结构图

Fig.1 Basic structure diagram of microgrid

微电网对外而言是一个整体,通过公共耦合点(point of common coupling, PCC)^[12]的开关控制与大电网相连或断开;微电网对内而言则是一个完整系统,依据其运行方式的不同,分为孤岛运行与并网运行。

孤岛运行是指微电网不与大电网相连,此状态下缺少与大电网的电能量交互,只利用本地的可再生能源为负荷供电^[13]。在这种情况下,微电网只需要考虑自身的负荷需求与能源生产的供需平衡关系即可,就能保证系统运行的稳定性和可靠性。因此,在孤岛运行模式下,微电网需要对储能设备的储能做出精确部署,以应对可再生能源波动与负荷不平衡的情况。微电网孤岛运行的优点是不受外部大电网故障的影响^[14],可实现电能自给自足。缺点是微电网运行的安全性与稳定性只取决于自身,因此孤岛运行模式对微电网的管理以及运维要求更高。

并网运行是指微电网和大电网之间相互连接,两者之间能够实现电力交换^[15]。这种运行方式可以根据需要进行切换,自身供电不足时,通过大电网为微电网提供电量支持,自身供电充盈时将微电网的电量输送到大电网中。在并网运行模式下,微电网需要考虑到自身与大电网之间的协调,确保微电网运行的稳定性和可靠性。并网运行的优势在于,当微电网设备出现故障或供电能力不足时,能够获得大电网的电力补充。同时,利用微电网中的可再生能源,可以为大电网提供清洁的、低成本的电力^[11]。缺点是并网运行对电能监控技术要求更高,并且在做优化调度方案时考虑因素更多,例如大电网分时电价、大电网与微电网传输距离等,使得并网运行下的微电网更难确定其调度方案。

1.2 蓄电池建模及特性分析

在无大电网支持的孤岛运行场景下,鉴于分布式电源的波动性与间歇性特征,需在微电网中配置储能设备,以实现电力供需平衡并抑制功率波动。本文选择蓄电池作为储能元件。荷电状态(state of charge, SoC)是反映电池能量状态的重要参数,以SoC作为能量协调控制策略的参数依据,可以提高协调策略的精确性。要想更加精确地实时地计算出电池的数值,就必须对电池外部电气参数与内部变量间的关系进行研究,在这种情况下必须对蓄电池的数学模型进行构建,从而找到两者之间的关系。

电流、功率、SoC、自放电率和温度等因素对电池的特性呈现出非线性的影响,因此,如果要对电池的建模进行全面的考虑,计算量巨大,而一般的控制器无法满足这样的要求。一个好的电池模型应该不仅能够精确地反映其物理性质,而且其自身的计算复杂性应该很低,计算简单,易于工程实施。目前最常见的电池模型主要有:等效电路模型^[16]、电化学反应模型^[17]、黑箱模型^[18]等。电化学反应模型是生产厂商用来设计电池的实验建模以修正电池的某些参数。等效电路模型用于对电池的外部特性进行分析,具有结构简单、易于实时计算、易于集成、精度较高、复杂性较低等优点,因此被广泛地用于对电池进行建模与状态评估。当前,众多学者提出的电池等效电路模型主要有PNGV, Thevenin模型、Rint模型等^[19]。

对电池进行建模,其目标是对电池的特征进行量化研究,所以一个好的电池模型,首先应当能够比较精确地反映出所需要的各个参数之间的关系。本文选择蓄电池的通用等效模型,如图2所示。

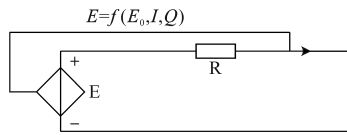


图2 蓄电池通用等效电路模型

Fig.2 General equivalent circuit model of storage batteries

等效电路模型由受控电压源和内阻构成,在充放电的过程中,电池的电压和电量的变化关系如下:

1) 放电时:

$$E = E_0 - KI^* \frac{Q}{Q - Q_t} - KQ_t \frac{Q}{Q - Q_t} + BI_e^{-BQ_t} \quad (1)$$

$$V = E - IR \quad (2)$$

$$Q_{\text{disch}}(t) = Q(t-1) - Q_t \quad (3)$$

2) 充电时:

$$E = E_0 - KI^* \frac{Q}{0.1Q - Q_t} - KQ_t \frac{Q}{Q - Q_t} + BI_e^{-BQ_t} \quad (4)$$

$$V = E + IR \quad (5)$$

$$Q_{\text{ch}}(t) = Q(t-1) - Q_t \quad (6)$$

其中

$$Q_t = I \cdot \eta \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$\text{SoC}(t) = \frac{Q(t)}{Q} \quad (8)$$

式中: E 为开路电压; E_0 为电池理想电压; Q 为电池容量; Q_t 为充电电荷量 $Q_{\text{ch}}(t)$ 或放电电荷量 $Q_{\text{disch}}(t)$; B 为电池SoC对电压的影响系数; I_e 为电池充放电电流值; K 为极化常数; $Q(t), Q(t-1)$ 分别为 $t, t-1$ 时刻的电池剩余容量; $\text{SoC}(t)$ 为 t 时刻电池的荷电状态; V, I 分别为电池端电压、电流; I^* 为滤波后的电流; R 为电池内阻; η 为充放电效率。

图3反映了锂电池端电压和SoC的关系,由图3可以看出,SoC在一定范围内,蓄电池端电压变化较小,只有在SoC较高或者较低的时候,蓄电池端电压变化速度快,电压变化明显。图4反映了锂电池由于内阻造成的功率损耗和SoC的相互关系,从图4可以看出,电池的功率损耗并不是恒定的,会随着内阻的变化不断发生改变,而内阻的变化又是与SoC相关的。结合图3和图4可知,SoC在0.1~0.9范围内变化时,蓄电池工作电压稳定而且功率损耗较小,处于最佳工作状态。

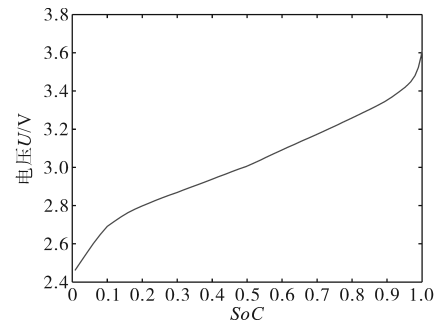


图3 锂电池端电压与SoC的关系

Fig.3 The relationship between the terminal voltage of lithium batteries and SoC

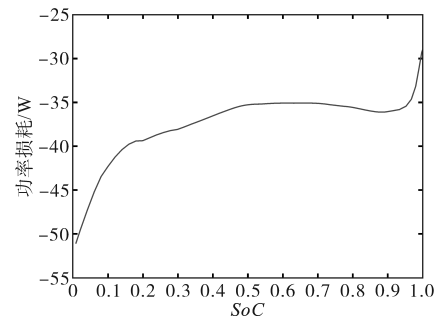


图4 锂电池内阻功率损耗与SoC的关系

Fig.4 The relationship between the internal resistance power loss of lithium batteries and SoC

储能电池充放电时,其内阻、端电压等参数会随着储能的剩余容量的改变而改变。假设储能系统中有 n 个储能单元,每个储能单元剩余电量由SoC来表示,其是保证电池系统安全运行的重要指标。SoC参数具体定义为电池剩余电量占总电量比值:

$$SoC_i = \frac{C_i(t)}{C_i} = \frac{C_i(0)}{C_i} - \frac{\rho_i}{C_i} \int_0^t I_i(t) dt \quad (9)$$

式中: $C_i(t)$ 为 t 时刻电池的剩余电量; C_i 为电池总电量; $C_i(0)$ 为初始时刻的电池电量; ρ_i 为充放电系数, 放电时为 1, 充电时 $\rho_i = \eta_i$, η_i 为库伦效率, $0 < \eta_i < 1$; $I_i(t)$ 为电池的输出电流。

电池处于充电状态时输出电流为负, 放电状态时输出电流为正。

式(9)也可表示为

$$SoC_i = 1 - \frac{C_a(t)}{C_i} \quad (10)$$

式中: $C_a(t)$ 为 t 时刻电池已消耗的电量。

因为需通过 SoC 间接表示电池的剩余电量, 而不能从储能设备直接获得 SoC , 因此对储能设备的 SoC 进行准确的估算是十分重要的, 常用的 SoC 估算方法有开路电压(open circuit voltage, OCV)法、负载电压法、电荷累积法等。

为了对电荷累积法造成的累计误差过大以及开路电压法造成的电压回弹进行补偿, 这里采取了将两种方法相结合的方法来估计 SoC 。测量分布式储能单元的开路电压和初始 SoC , 之后根据电荷累积法计算 SoC , 计算公式如下:

$$SoC_i = SoC_{0i} - \frac{1}{C_i} \int_0^t I_i = SoC_{0i} - \frac{1}{C_i U_i} \int_0^t P_i dt \quad (11)$$

式中: SoC_{0i} 为分布式储能单元初始荷电状态; U_i, P_i 分别为分布式储能单元的电压、功率。

在微电网中, 分布式储能单元起到削峰填谷的作用, 以平衡发电端与用户端的能量。其在发电量大于用电需求时, 存储多余电力, 在发电量小于用电需求时, 提供多余电力。使用多组储能时, 为了防止储能系统过充或过放, 需平衡各储能 SoC 。因此, 在放电时, SoC 高的储能设备放电应比 SoC 低的储能设备大, 在充电时, SoC 低的储能设备充电应比 SoC 高的储能设备大, 从而实现各储能设备的 SoC 均衡。由式(9)可知, 电池的荷电状态受电池的容量、电流、初始荷电状态等因素影响, 所以要实现荷电状态均衡的目标, 需要综合考虑这些影响因素。

1.3 微电网的能量管理策略

制定微电网的能量管理策略时, 要全面地考虑系统中各单元的实际运行状态, 在满足不同系统运行要求的同时, 保证系统的安全、稳定运行。目前, 直流微电网的能量管理策略大致分为集中

式、分布式和分层控制三类, 且得到了广泛应用。

如图5所示, 集中式控制利用中央控制器采集和处理微电网系统信息, 并结合微电网的运行情况制定相应的策略, 完成系统优化。优点是控制精度较高, 不足之处是通信量过大、通信网络繁琐、过于依赖中央控制器, 当系统中的通信线路出现故障或中央控制器不能正常运行时, 将对系统的正常控制过程造成极其严重的影响, 系统的控制将面临失效的问题。

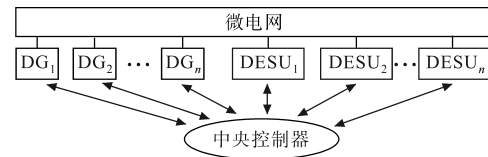


图5 集中控制结构

Fig.5 Centralized control structure

所以集中式控制对中央控制器、通信线路的可靠性要求较高。因此, 为更好地消除集中式控制存在的问题, 分布式控制结构被提出, 其主要由微电网的物理系统与通信网络构成了一个分布式控制结构, 如图6所示, 物理系统的主要目的是本地的局部控制。系统中的每个单元都有独立的本地控制器, 各单元可根据本地信息实现自我管理和控制。通信网是在本地控制的基础上, 实现各单元的信息共享, 以共同完成相应的控制目标。分布式控制可靠性高, 但控制精度低。

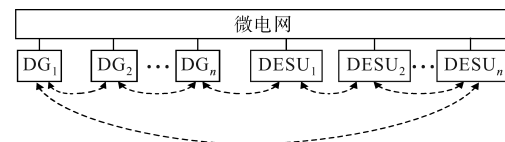


图6 分布式控制结构

Fig.6 Distributed control structure

分层控制结构中不仅存在着中央控制器, 还存在着分布控制器。它将集中式和分布式两种架构的优势相结合, 对控制对象进行分层处理, 从而达到各个单元独立、自主运行的目的。集中式控制可以实现对上一层的控制, 比如能源调度、优化控制等, 系统控制精度、可靠性及可扩展性较高。

储能系统在微电网中的控制策略对电力系统的稳定性、经济性以及能效有着至关重要的作用。常见的储能控制策略主要包括功率平衡控制、电压频率控制、 SoC 管理控制、经济调度控制、下垂控制和预测控制, 每种策略的控制目标、实现方式以及控制方程各有不同。

1) 功率平衡控制(power balance control, PBC):

功率平衡控制的主要目的是在负荷波动和分布式电源发电不稳定时,通过储能系统进行功率调节,以实现微电网内的供需平衡,如下式所示:

$$P_{\text{ESS}} = P_{\text{gen}} - P_{\text{load}} \quad (12)$$

式中: P_{ESS} 为储能系统的功率输出; P_{gen} 为分布式电源的发电功率; P_{load} 为负载消耗的功率。

当 $P_{\text{gen}} > P_{\text{load}}$ 时,储能系统进行充电;反之,储能系统放电。

2)电压频率控制(voltage and frequency regulation):在孤岛运行模式下,微电网通常需要通过储能系统来调节系统电压和频率。通过调整储能设备的充放电功率,确保电压和频率保持在合理范围内。

频率控制方程为

$$P_{\text{ESS}} = K_f \cdot (\Delta f) \quad (13)$$

其中

$$\Delta f = f_{\text{ref}} - f_{\text{measured}}$$

式中: K_f 为频率调节系数; Δf 为参考频率 f_{ref} 与测量频率 f_{measured} 之间的偏差。

电压控制方程为

$$Q_{\text{ESS}} = K_v \cdot (\Delta V) \quad (14)$$

其中

$$\Delta V = V_{\text{ref}} - V_{\text{measured}}$$

式中: K_v 为电压调节系数; ΔV 为参考电压 V_{ref} 与测量电压 V_{measured} 之间的偏差。

当频率或电压偏离参考值时,储能系统通过调整功率输出(有功和无功)来恢复电压和频率稳定。

3)SoC管理控制:储能系统的状态(如电池的荷电状态)对其寿命和运行效率至关重要,SoC管理控制策略通过监控电池的SoC来调节充放电操作,确保电池运行在安全、高效的范围内,如下式:

$$P_{\text{ESS}} = \begin{cases} P_{\text{charge}} & \text{SoC} < \text{SoC}_{\text{low}} \\ 0 & \text{SoC}_{\text{low}} \leq \text{SoC} \leq \text{SoC}_{\text{high}} \\ P_{\text{discharge}} & \text{SoC} > \text{SoC}_{\text{high}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: SoC_{low} , SoC_{high} 分别为设定的最低和最高SoC阈值; P_{charge} , $P_{\text{discharge}}$ 分别为充电和放电功率。

该策略确保电池在安全的SoC范围内运行,并避免过度充放电对电池寿命的影响。

4)经济调度控制(economic dispatch control):经济调度控制通过优化储能系统的充放电时刻和功率,以降低电力系统的运行成本。常见的目标是减少购电成本或最大化可再生能源的利用率。基于成本最小化的控制方程为

$$\min \sum_t [C_{\text{grid}}(t) \cdot P_{\text{grid}}(t) + C_{\text{ESS}}(t) \cdot P_{\text{ESS}}(t)] \quad (16)$$

式中: $C_{\text{grid}}(t)$, $C_{\text{ESS}}(t)$ 分别为电网和储能系统在时间 t 的电力成本; $P_{\text{grid}}(t)$, $P_{\text{ESS}}(t)$ 分别为电网和储能系统在时间 t 的功率。

该策略通过在电价低时充电、高时放电,实现经济效益的最大化。

5)下垂控制:下垂控制主要用于并网或孤岛模式下的微电网,通过储能单元调节有功功率和无功功率,确保系统频率和电压稳定。

有功功率频率下垂关系为

$$P = P_0 - K_p \cdot (f - f_0) \quad (17)$$

式中: P_0 为初始有功功率; K_p 为有功功率下垂系数; f_0 为参考频率。

无功功率电压下垂关系为

$$Q = Q_0 - K_q \cdot (V - V_0) \quad (18)$$

式中: Q_0 为初始无功功率; K_q 为无功功率下垂系数; V_0 为参考电压。

下垂控制策略使得多个储能单元在不需通信的情况下,实现功率和频率、电压的自动调节与分配。

6)预测控制(model predictive control, MPC):预测控制通过建立系统模型,预测未来的负荷需求和储能状态,动态调整储能设备的控制策略,使得储能设备在未来一段时间内的运行效果最优。基于预测模型的控制方程为

$$\min \sum_{t=t_0}^{t_n} [C(t) + \lambda \cdot \Delta P(t)] \quad (19)$$

式中: $C(t)$ 为当前时刻的运行成本; $\Delta P(t)$ 为功率变化的惩罚项; λ 为惩罚系数。

预测控制策略通过考虑未来多步的系统状态,做出最优的当前控制决策。

1.4 分布式储能协同控制装置及其控制架构

为应对现场通讯条件的不足,本文进一步提出了面向分布式储能的主被动协调控制方法与系统架构。

该系统由分布式储能装置、协同调控装置及其协同控制架构建立了低通信依赖度的分布式储能控制体系。根据分布式储能装置自身的荷电状态,自动进入主动模式、被动模式或死区保护模式。在主动模式且弱通信的情况下,分布式储能装置只能按照预设曲线进行充放电;若在主动模式且有通信的情况下,分布式储能装置可按照人为整定的曲线进行充放电。

分布式储能装置由常规的储能设备和相应的就地控制器构成。常规的储能设备指由电池

构成的充放电设备,可在就地控制器的控制下完成充放电功能。就地控制器为普通的基于嵌入式计算机或微控制器(单片机)的测控单元,具有和上级协同调控装置通信的功能。通信的方式可采用现有10 kV配电网常用的有线或无线通信方式。

协同调控装置为基于嵌入式计算机的设备,功能包括:1)量测功能,主要是量测电网的频率,进而为下发控制指令提供分析计算的依据;2)计算功能,可以根据分布式等效储能的荷电状态以及电网的调频需求,优化分布式等效储能的充放电的功率与静态特性;3)通信功能,通过与分布式等效储能装置之间功率协调实现一定的主动控制功能。

协同控制基本运行策略为:可以收集分布式等效储能的状态,明确各个储能装置的调节能力,再通过频率测量了解电网的附加功率需求响应,随后通过协调优化计算出各个分布式储能的充放电功率及其静态曲线,最后通过通信系统下发。

如图7所示,建立低通信依赖度的分布式储能控制体系。在此只讨论分布式储能系统与调度中心有通信和弱通信两种情况下,分布式储能装置充放电功率的不同。针对用户侧的需要,提出了一种有选择性且自由度较高的调节分布式储能装置充放电的控制方法,包含了弱通信情况下按照预设的固定模式充放电,以及在有通信且SoC在规定范围内的情况下,由协同调控中心人为整定发出指令曲线。固定调度指令作为常规情况下储能系统的运行程序,如在强通信、SoC的值在规定范围内且需要人为调整的情况下,可通过相关调控中心发出相应指令。

弱通信是指分布式储能系统与协同调控中心之间的通信条件受限,本文设定为以下条件之一:

- 1)信号强度阈值,通信链路存在间歇性中断(丢包率 $\geq 5\%$);
- 2)数据传输速率限制,通信带宽无法满足实时高频指令交互需求;
- 3)指令传输延迟,并难以支持动态调整的主动协同控制。

在弱通信条件下,系统自动切换至被动协同模式,储能装置仅依赖本地控制器执行预设充放电曲线,实现基础功率调节功能,确保微电网在

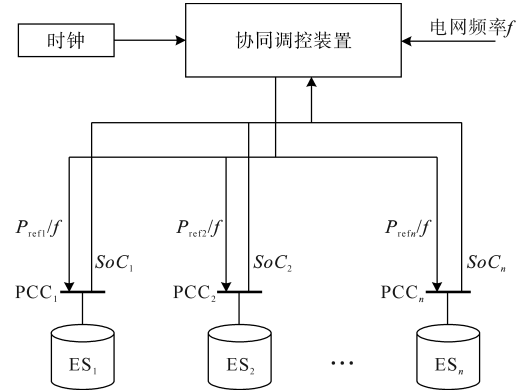


图7 分布式等效储能控制体系

Fig.7 Distributed equivalent energy storage control system

通信资源受限时的稳定运行。

设置 P_{ref} 为协同调控装置下发的当前出力指令; SoC 为分布式等效储能装置荷电状态当前值; P 为SoC控制的功率量; SoC_E 为储能系统荷电状态的预先设定值; k 为一天96点或288点。上述不同通信条件下主被动协同模式的响应量如下式所示:

$$P_{ref(k)} = P_{w(k)} + \Delta P_w \quad (20)$$

$$P_{w(k)} = \sum_{i=0}^m a_i [SoC_{(k-i)} - SoC_{E(k-i)}] \quad (21)$$

$$\Delta P_w = [b_1(f - f_0) + b_2(U - U_0)] \times P_N \quad (22)$$

式中: $P_{w(k)}$ 为第 k 个调度时段的被动协同基准出力值; ΔP_w 为主动协同修正分量; a_i 为第 i 个时段的SoC偏差权重系数; b_1 为频率下垂调节系数; b_2 为电压下垂调节系数; P_N 为储能单元的额定充放电功率; U_0, f_0 分别为对应储能系统输出功率刚好满足电网内负载功率时的平衡点的电压和频率。

1.5 分布式等效储能装置的主被动自适应协调控制方法

基于上述分析,本文进一步提出了一种分布式等效储能装置的主被动自适应协调控制方法。如图8所示,SoC极低或极高的情况下,分布式储能装置进入死区保护模式,分布式储能装置不能进行任何充放电操作;SoC较高或较低的情况下,分布式等效储能装置进入被动模式,只能根据预先设定好的指令进行充放电,如图8中所示的唯一直线(静态曲线);SoC处于适中情况下,分布式等效储能装置进入主被动自适应模式,如图8中方框限定的矩形阴影。

主被动自适应模式工作原理为:如果通信正常,则进入主动模式,由协同调控装置指挥协调,可更好地完成系统的充放电任务;如果通信不正常,则进入被动模式,由分布式储能装置自主地

确定运行模式,包括充放电曲线与充放电功率。被动模式下,一般按照预设的模式运行,如图8中的示例曲线。极端情况下可由图8中的矩形框构成继电特性,采用继电特性的被动模式具有最佳的系统维持能力,但是状态切换时对系统的冲击较大。

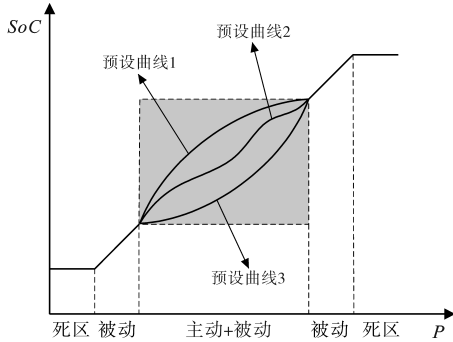


图8 荷电状态和协同调控装置下发指令的关系

Fig.8 The relationship between the state of charge and the instructions issued by the cooperative control device

根据此方法,分布式储能装置在任何通信情况下都可以安全可靠稳定地进行充放电,同时能够根据现实需求在一定范围内自由调整充放电功率,显著降低了对通信的要求。

2 仿真分析

采用 Matlab2021 搭建系统仿真模型,并将本文所提出的控制策略运用于模型中,主要参数如表1所示。

表1 交流微电网仿真主要参数

Tab.1 Main parameters of AC microgrid simulation

参数	数值	参数	数值
单个储能装置额定电压	780 V	电池响应时间	0.01 s
单个储能装置额定容量	100 A·h	交流系统额定电压	400 V
单个储能装置初始荷电状态	50%	交流系统额定频率	50 Hz

初始时刻,控制策略下输出有功、无功功率指令 $P_{reference} = 2 \text{ kW}$, $Q_{reference} = 0 \text{ kvar}$, $U_{battery}$ 维持在 840 V 左右; $t = 0.19 \text{ s}$ 时,储能电池输出功率经小幅波动稳定在 2 kW。仿真时长共 2 s,仿真呈现了单个储能在控制策略下的响应速度,如图9所示。

当多个储能模块并联运行时,根据本文所提控制策略,储能的输出有功功率随该储能装置的荷电状态值的改变而改变。当 $20\% < SoC < 40\%$ 与 $60\% < SoC < 80\%$ 时,进入被动控制模式,此时提前设定的储能输出(吸收)有功功率 $P_{reference} = 2 \text{ kW}$; 当 $40\% < SoC < 60\%$ 时,进入主动控制模式,此时人为整定了一段 $P_{reference}$;

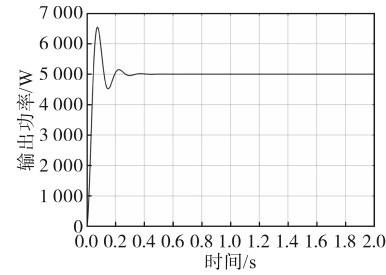


图9 单个储能设定有功功率输出为5 kW时2 s内的响应情况

Fig.9 The response situation within 2 s when the active power output of a single energy storage is set to 5 kW

为整定了一段 $P_{reference}$; 当 $SoC < 20\%$ 和 $SoC > 80\%$ 时,进入死区模式,在该情况下,储能模块不再进行任何的充放电。仿真模拟了三个储能模块并联运行。本次仿真对三个初始荷电状态不同的储能模块并联运行场景进行模拟:储能1的 $SoC_1 = 70\%$ 、储能2的 $SoC_2 = 50\%$ 、储能3的 $SoC_3 = 15\%$ 。在 2 s 的仿真时长内,结果显示各储能模块因初始 SoC 差异,其输出有功功率按预设控制策略呈现不同变化趋势:最终 P_1 稳定在 2 kW, P_2 按人工整定曲线规律运行, P_3 功率为 0 kW,具体波形如图10所示。

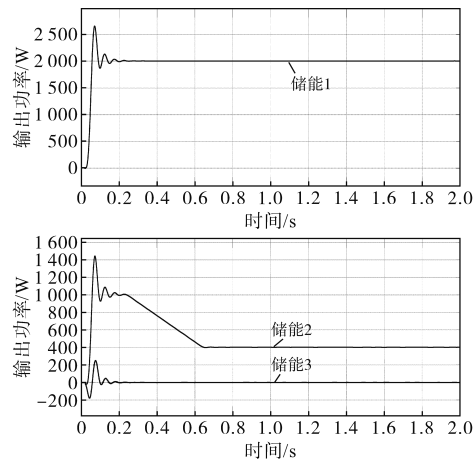


图10 初始SoC不同的储能1,2,3在2 s内的响应情况

Fig.10 The response situations of different energy storage 1, 2, and 3 of the initial SoC within 2 s

模拟单个储能模块在 1 h 内放电情况,储能1初始荷电状态值为 70%。控制策略设置为:当 $20\% < SoC < 40\%$ 和 $60\% < SoC < 80\%$ 时,进入被动控制模式,此时提前设定的储能输出(吸收)有功功率 $P_{reference} = 1 \text{ kW}$; 当 $40\% < SoC < 60\%$ 时,进入主动控制模式,此时人为整定了一段 $P_{reference}$; 当 $20\% < SoC < 80\%$ 时,进入死区模式,在该情况下,储能模块不再进行任何的充放电。如图11所示, t 在 1 000 s 内时,处于被动控制模式,此时储能输出功率为 1 kW; 当 $t = 1 \text{ 000 s}$ 时,储能 SoC 降低到

60%,储能输出功率有明显变化,此时进入主动控制模式;当 $t = 1553\text{ s}$,储能SoC降低到40%,储能输出功率又回到1 kW此时再次进入被动控制模式;当 $t = 3558\text{ s}$ 时,储能SoC降低到20%,此时储能不再输出有功功率,进入死区模式。

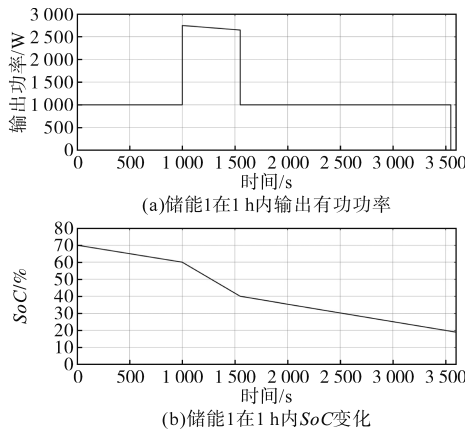


图11 1 h时间内的单个储能模块输出功率波形与荷电状态值波形图

Fig.11 The output power waveform and state of charge value waveform of a single energy storage module within 1 h

3 结论

本文提出的面向分布式等效能源的主被动协调控制方法,可以在无通信或通信可靠性较低背景下,实现功率调配功能的总体优化,从而达到理想的区域运行效果。通过理论推导和仿真实验得到以下结论:

- 1) 本文通过提出的分布式等效电源装置、协调控制装置及相应的协同控制架构,构建了低通信依赖的分布式储能控制体系;
- 2) 所提出的控制,令储能装置在运行过程中可以自调节或主动控制输出(吸收)有功功率的大小,同时通过荷电状态值的限制,防止储能装置过充或过放;
- 3) 本文的控制策略可有效控制储能装置充放电功率,同时能够保护电池,延长其使用时间。

参考文献

[1] 周佳奇,曹金碧,高童,等.分布式电源的接入对配电网产生的影响分析研究[J].现代工业经济和信息化,2024,14(9):1-11.
ZHOU Jiaqi, CAO Jinbi, GAO Tong, et al. Analysis on impact of distributed generation integration on distribution network[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2024, 14(9): 1-11.

[2] 周原冰,龚乃玮,王皓界,等.中国电动汽车发展及车网互动对新型储能配置的影响[J].中国电力,2024,57(10):110-112.
ZHOU Yuanbing, GONG Naiwei, WANG Haojie, et al. Impact of electric vehicle development and vehicle-grid interaction on new energy storage allocation in China[J]. Electric Power, 2024, 57(10):110-112.

[3] 杨鑫磊.中国可再生能源发展现状、挑战及政策建议[J].电力设备管理,2024(17):66-68.
YANG Xinlei. Development status, challenges and policy suggestions of renewable energy in China[J]. Electric Power Equipment Management, 2024(17):66-68.

[4] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9):2-11.

[5] 瞿波,李鑫,项兴尧,等.考虑网络重构的微电网/离网协同调度策略研究[J].电气传动,2025,55(2):48-58.
QU Bo, LI Xin, XIANG Xingyao, et al. Research on grid-connected/off-grid collaborative scheduling strategy of microgrid considering network reconfiguration[J]. Electric Drive, 2025, 55(2):48-58.

[6] 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. Review on flexible and safe operation of renewable energy microgrid enabled by energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1):1-18, 369.

[7] 朱振康.微电网多功能并网逆变器多模态控制策略研究[D].北京:北方工业大学,2024.
ZHU Zhenkang. Research on multi-modal control strategy for multi-functional grid-connected inverter in microgrid[D]. Beijing: North China University of Technology, 2024.

[8] 仇佳鑫,查翔,李妍.微电网并网运行与孤岛运行模式切换的研究[J].光源与照明,2024(11):189-191.
QIU Jiaxin, ZHA Xiang, LI Yan. Research on mode switching between grid-connected and islanded operation of microgrid[J]. Lamps & Lighting, 2024(11):189-191.

[9] 林雪山,张鹏飞.储能技术在微电网中的应用与效果评价[J].中国战略新兴产业,2024(21):75-77.
LIN Xueshan, ZHANG Pengfei. Application and effect evaluation of energy storage technology in microgrid[J]. China Strategic Emerging Industry, 2024(21):75-77.

[10] 蔡晓钦.微电网接入配电网协同优化控制研究[D].北京:北方工业大学,2024.
CAI Xiaochin. Research on cooperative optimal control of microgrid integrated into distribution network[D]. Beijing: North China University of Technology, 2024.

[11] 吕志敏.自动控制与储能技术在智能微电网中的应用[J].储能科学与技术,2023,12(11):3581-3582.

- LÜ Zhimin. Application of automatic control and energy storage technology in smart microgrid[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(11):3581-3582.
- [12] 温景茂,吴小欢,胡翔,等.基于公共耦合点的微电网孤岛判断方法[J]. *电机技术*, 2021(2):30-34.
- WEN Jingmao, WU Xiaohuan, HU Xiang, et al. Islanding detection method for microgrid based on point of common coupling [J]. *Electrical Machinery Technology*, 2021(2):30-34.
- [13] 马锐,李相俊,李文启,等.可再生能源供电区域电网中储能系统协同调度策略[J]. *发电技术*, 2021, 42(1):31-39.
- MA Rui, LI Xiangjun, LI Wenqi, et al. Cooperative scheduling strategy of energy storage system in regional power grid supplied by renewable energy[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(1):31-39.
- [14] 宋昕一,徐永海,袁敞,等.孤岛直流微电网的多储能SoC稳定均衡控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20):49-59.
- SONG Xinyi, XU Yonghai, YUAN Chang, et al. SoC stability and equalization control strategy for multi-energy storage in islanded DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20):49-59.
- [15] 陈仁钊,陈杨,夏岩,等.主从结构微电网并网/孤岛运行模式平滑切换控制策略[J]. *四川电力技术*, 2024, 47(5):8-13, 52.
- CHEN Renzhao, CHEN Yang, XIA Yan, et al. Smooth switching control strategy for grid-connected/islanded operation mode of master-slave structure microgrid[J]. *Sichuan Electric Power Technology*, 2024, 47(5):8-13, 52.
- [16] 朱业,陈渊睿,陈阳,等.基于自适应动态滑动窗口的锂电池参数辨识与SOC协同估计[J]. *电气传动*, 2024, 54(2):12-20, 64.
- ZHU Ye, CHEN Yuanrui, CHEN Yang, et al. Parameter identification and SOC cooperative estimation of lithium battery based on adaptive dynamic sliding window[J]. *Electric Drive*, 2024, 54(2):12-20, 64.
- [17] 呼延璟.基于电化学模型的钠离子电池SoC估计研究[D].太原:中北大学, 2024.
- HUYAN Jing. Research on SoC estimation of sodium-ion batteries based on electrochemical model[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [18] 姜静雅,王玮,唐芬,等.基于电网扰动暂态响应分析的虚拟同步机黑箱建模[J]. *电网技术*, 2020, 44(11):4227-4236.
- JIANG Jingya, WANG Wei, TANG Fen, et al. Black-box modeling of virtual synchronous generator based on transient response analysis under grid disturbance[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(11):4227-4236.
- [19] 黄莉莉,任星星,苗博博,等.基于改进Rint模型锂离子电池SoC估计[J]. *电池工业*, 2022, 26(4):177-180.
- HUANG Lili, REN Xingxing, MIAO Bobo, et al. SoC estimation of lithium-ion battery based on improved Rint model[J]. *Chinese Battery Industry*, 2022, 26(4):177-180.

收稿日期:2025-04-20

修改稿日期:2025-06-18