



Aalborg Universitet

AALBORG
UNIVERSITY

Tang, Fen; Jiang, Jiuchun; Wu, Dan; Zhou, Xiao; Guerrero, Josep M.

Published in:
Dianli Xitong Zidonghua

DOI (link to publication from Publisher):
[10.7500/AEPS20141218002](https://doi.org/10.7500/AEPS20141218002)

Publication date:
2015

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Tang, F., Jiang, J., Wu, D., Zhou, X., & Guerrero, J. M. (2015). . *Dianli Xitong Zidonghua*, 39(22), 30-36.
<https://doi.org/10.7500/AEPS20141218002>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

考虑电池储能系统荷电状态的有功功率协调控制

唐 芬^{1,2}, 姜久春^{1,2}, 吴 丹³, 周 喻^{1,2}, Josep M. GUERRERO³

(1. 北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心, 北京市 100044;

2. 北京交通大学北京电动车辆协同创新中心, 北京市 100044; 3. 丹麦奥尔堡大学能源技术系, 奥尔堡 9220, 丹麦)

摘要: 微电网孤岛运行时, 若供需存在较长时间的不平衡, 传统的无互联信号线有功功率协调控制可能导致电池储能系统(BESS)荷电状态(SOC)超出安全运行范围。针对该问题, 提出了一种考虑 SOC 的多 BESS 与可再生能源(RES)间的分布式有功功率协调控制策略。该方法通过基于瞬时功率的变斜率下垂控制、基于 SOC 的恒功率比例-积分(PI)下垂控制以及基于母线频率的功率下垂控制的集成来实现有功功率的无互联信号线自治协调控制。所提控制方法不仅可简单植入 BESS 和 RES 的控制系统中而无需修改其内环控制结构, 而且能使 SOC 处于安全范围的同时最大化 RES 利用。实时仿真结果表明了所提策略的有效性。

关键词: 微电网(微网); 自治功率分配; 功率下垂控制; 协调控制

0 引言

近年来, 微电网概念备受关注, 其与电网互为支撑, 被视为利用分布式电源(distributed generator, DG)的最佳途径^[1-3]。当微电网孤岛运行时, 由于 DG 中的可再生能源(renewable energy source, RES)输出功率的间歇波动性, 一般需储能单元提供供需功率平衡和电压支撑^[4]。为了实现多台储能单元间负荷的合理分担, 基于下垂控制的无互联信号线方法以及其改进型被广泛应用于微电网^[5-10], 然而该类方法仅是通过预设的频率(或电压)与有功功率(或无功功率)的下垂曲线来实现功率分配, 并未考虑微电网元件状态如 DG 可用功率、储能单元的荷电状态(state of charge, SOC)等。因此若供需存在较长时间不匹配, 该类方法有可能导致电池储能系统(battery energy storage system, BESS)^[11]的 SOC 超出安全运行范围。虽然可通过 BESS/RES 容量配比优化设计^[12-14]来有效减少 SOC 超出运行范围概率, 但是为保证微电网安全稳定运行, 仍需采用集中控制结构^[15-17]的微电网能量管理单元进行协调, 其将微电网元件状态传给集中控制器, 然后由集中控制器统一协调决策。然而由于微电网内资源分布内在的分散性和集中控制器数据处理的有限性, 这种控制结构更适合传统集中的电力系统。同时若

集中控制器出现故障有可能导致系统协调失效。

针对以上问题, 提出了一种适用于微电网中多台 BESS 与多台 RES 间的分布式有功功率协调控制算法, 其无需外部通信介入即可保证储能电池的 SOC 运行于安全范围内。该方法是在作者前期 BESS 与 RES 协调控制策略以及传统下垂控制、恒功率下垂控制、各下垂控制切换过程中稳定性分析的基础上^[18-20]提出的一种更具普适性的有功功率协调控制方法。其中, 文献[18-19]提出了全 SOC 范围内的有功功率协调控制, 但文献[18]所提方案比较适合一台 BESS 与多台 RES 间协调控制, 文献[19]主要针对直流微电网。文献[20]虽然将协调控制方案范围扩展至多台 BESS 和 RES, 但其较难实现 BESS 功率限幅。

1 孤岛运行工况下功率协调控制

典型微电网结构如图 1 所示, 由 h_{DG} 台 DG, h_E 台 BESS, h_L 个负荷组成, DG, BESS 和负荷与电网交换的功率分别用 P_{DG_i} ($i=1, 2, \dots, h_{DG}$), P_{E_i} ($i=1, 2, \dots, h_E$), P_{L_i} ($i=1, 2, \dots, h_L$) 表示。根据智能转换开关状态不同, 微电网可运行于并网或孤岛模式。孤岛运行工况下, 根据 BESS 的 SOC, 分为 3 个区域: 高 SOC 区域($S_{SOC_u}, 100\%$)、正常 SOC 区域 [S_{SOC_d}, S_{SOC_u}]、低 SOC 区域(S_{SOC_0}, S_{SOC_d})。其中, S_{SOC_u} 和 S_{SOC_d} 分别为协调控制的 SOC 上、下限值, S_{SOC_0} 为 SOC 最小阈值, 表明已没有足够容量维持系统正常运行。低 SOC 工况下的协调控制参见文

收稿日期: 2014-12-18; 修回日期: 2015-06-30。
国家能源应用技术研究及工程示范项目(NY20150301)。

献[18-19],限于篇幅,本文重点研究高 SOC 工况下多台 BESS 与 RES 间的协调控制策略并假设系统中 DG 均为 RES,根据 SOC,有功功率协调控制主要分为以下 3 种工况。

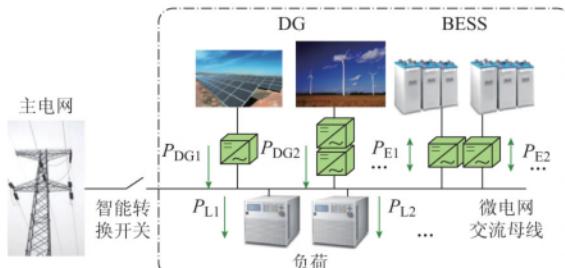


图 1 典型微电网结构

Fig.1 Typical configuration of an AC microgrid

工况 1: 系统内 BESS 均处于正常 SOC 区域。协调控制目标为: ① RES 运行于最大功率点 (maximum power point, MPP), 实现其最大化利用; ② BESS 均可担当系统组网单元, 稳定微电网母线电压和频率。由于没有主电网支撑作用, BESS 承担平衡供需功率差角色, 存在 $\sum P_{Ei} = \sum P_{Li} - \sum P_{DGi}$ 。

工况 2: 至少有一台 BESS 处于正常 SOC 区域, 以 BESS_n 表示, 其他 BESS 处于高 SOC 区域, 以 BESS_h 表示。协调控制目标为限制 BESS_h 充电功率, 防止过充。同时, 也需保证 BESS_n 充电功率不超过额定允许最大充电功率。其可分两种情况: ①若 RES 功率除去供给负载外仍大于 BESS_n 允许的最大充电功率, 则需对 BESS_n 采取功率限幅的同时降低 RES 功率; ② BESS_n 充电功率在允许范围内, 则 BESS_n 无需限幅, RES 仍可工作于 MPP。

工况 3: BESS 均处于高 SOC 区域, 协调控制目标是防止 BESS 过充, 当 RES 功率超过负载功率时, 需控制 $P_{Ei} \approx 0$, 同时降低 RES 功率, 满足 $\sum P_{DGi} \approx \sum P_{Li}$ 。

当源条件和负载条件发生变化时, 协调控制策略应保证系统能在各个工况间平滑过渡。

值得指出的是, 以上协调控制目标适用于多台 BESS 和 RES 组成的微电网结构。当系统只有一台 BESS 单元时, 则协调控制目标参见工况 1 和 3。

2 考虑 BESS 的 SOC 的有功功率协调控制

2.1 BESS 改进控制策略

假设线路阻抗为感性, 传统有功功率的分配常采用 $P-\omega$ 下垂控制来实现。考虑到工况 2 中的情况①, 为实现 BESS_n 的功率限幅, 提出基于瞬时功率的变斜率下垂控制。同时为防止工况 2 和 3 中

BESS_h 的过充, 提出基于 SOC 的恒功率比例-积分 (PI) 下垂控制, 集成两种控制思想后形成式(1)所示的控制方程。

$$\omega_E = \omega_{EN} - m_p P_E - \omega_{SOC} \quad (1)$$

式中: $\omega_E, \omega_{EN}, m_p, P_E, \omega_{SOC}$ 分别为输出角频率、空载角频率、角频率下垂增益、输出有功功率(以放电为正方向)、SOC 控制量。

基于瞬时功率的变斜率下垂控制特点是 m_p 由固定部分 m_{pN} 和变斜率部分 m_{pv} 两部分组成。

$$\begin{cases} m_p = m_{pN} + m_{pv} \\ m_{pN} = \frac{\omega_{maxN} - \omega_{minN}}{2P_{EN}} \\ m_{pv} = \frac{k_{im}}{s} \max(0, (-P_E - P_{EN})) \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_{im} 为斜率积分系数; m_{pN} 为正常工作范围时斜率, 其值取决于允许的角频率变动范围 $[\omega_{minN}, \omega_{maxN}]$ 和额定功率 P_{EN} ; m_{pv} 则取决于限定的充电功率如 P_{EN} 和当前的瞬时功率 P_E 。

若当前的充电功率在限定值内, 则 $m_{pv} = 0$, 即下垂曲线斜率为 m_{pN} 。若充电功率超过 P_{EN} (即 $-P_E > P_{EN}$), 则 m_{pv} 积分项开始作用。离散化式(1), 令控制周期为 T_s , 则充电功率连续超过额定功率 h 个控制周期后, 有

$$\begin{aligned} \omega_E(h) = \omega_{EN} - (m_{pN} + m_{pv}(h))P_E(h) - \omega_{SOC} = \\ \omega_{EN} - \left[m_{pN} + k_{im} T_s \sum_{j=0}^h (-P_E(j) - \right. \\ \left. P_{EN}) \right] P_E(h) - \omega_{SOC} \end{aligned} \quad (3)$$

可见, m_{pv} 不断变大(如图 2(a)所示), 其中 ω_{maxL} 和 ω_{minL} 为极限角频率上下限, 配合 RES 基于母线频率(frequency bus signaling, FBS)的功率下垂控制, 若将其在 ω_{maxL} 的功率设定为 0, 则系统最终将稳定运行于 $P_E \approx -P_{EN}$ 。实现框图如 2(b)所示。

基于 SOC 的恒功率 PI 下垂控制思想为:

$$\omega_{SOC} = \frac{k_{is}}{s} P_E \text{Relay}(S_{SOC} - S_{SOCu}) \quad (4)$$

式中: Relay(·) 为滞环函数; k_{is} 为 SOC 斜率积分系数, 当 SOC 值 $S_{SOC} > S_{SOCu}$ 时, 取值为 1, 当 $S_{SOC} \leq S_{SOCu} - S_{SOCH}$ 时, 取值为 0, 其中 S_{SOCH} 为滞环宽度, 防止抖动。

其原理和实施方法如图 3 所示。

若 Relay(·) 在 k_0 个周期取值变为 1, 则离散化后, k 个周期时刻的下垂曲线为:

$$\begin{aligned} \omega_E(k) = \omega_{EN} - k_{is} T_s \sum_{i=k_0}^{k-1} P_E(i) - (m_p + \\ k_{is} T_s) P_E(k) \end{aligned} \quad (5)$$

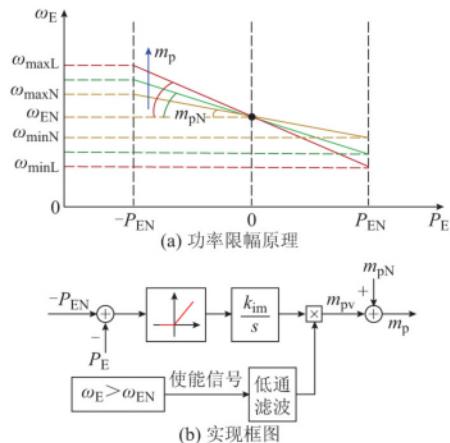


图 2 基于瞬时功率的变斜率下垂控制限幅原理与框图
Fig.2 Power limit principle and diagram of variable-slope droop control based on instantaneous power

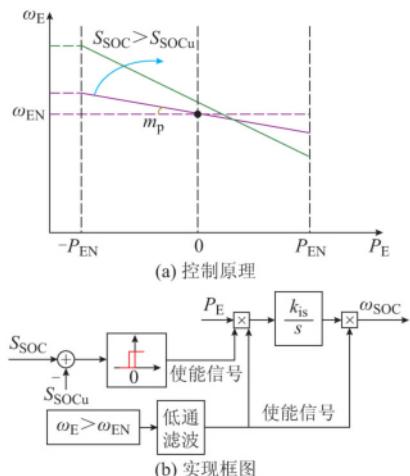


图 3 基于 SOC 的恒功率 PI 下垂控制原理与框图
Fig.3 Principle and diagram of constant-power PI droop control based on SOC

由式(5)可见,下垂曲线斜率变大,由于充电时功率为负值,空载角频率点逐渐上升,如图 3(a)所示。稳态时,通过与其他 BESS 和 RES 协调控制的配合,可将该 BESS 的功率限定在零。

2.2 基于 FBS 的功率下垂控制

为实现工况 2 情况①、工况 3 中 RES 按需降功率运行,提出基于 FBS 的功率下垂控制,其控制方程为:

$$P_{DG} = \begin{cases} P_{MPP} & \omega_B \leq \omega_{maxN} \\ P_{MPP} - m_{DG}(\omega_B - \omega_{maxN}) & \omega_B > \omega_{maxN} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{DG} 、 P_{MPP} 、 ω_B 、 m_{DG} 分别为 RES 有功功率、MPP 功率、反馈角频率、功率下垂系数。

m_{DG} 的取值为:

$$m_{DG} = \frac{P_{MPP}}{\omega_{maxL} - \omega_{maxN}} \quad (7)$$

$P_{DG}-\omega_B$ 曲线如图 4 所示。当 RES 检测到 ω_B 超过 ω_{maxN} , 将以斜率 m_{DG} 逐渐减小功率。

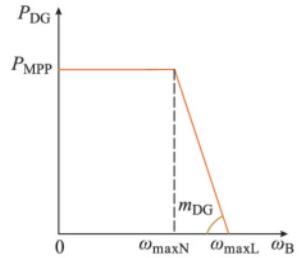


图 4 基于 FBS 的功率下垂控制
Fig.4 Power droop control based on FBS

2.3 不同工况下所提控制策略协调原理分析

图 5 为所提控制策略在不同工况下的协调控制原理,为简化分析,以 2 台 BESS 为例阐述,图中 RES 功率代表多台 RES 的总功率。初始条件下,系统均运行于工况 1,如图 5 中 A 点所示。

Case 1: 随着持续充电,系统进入工况 2 情况②,如图 5(a)所示。BESS2 处于高 SOC 区域,式(4)中 ω_{SOC} 积分环节开始作用,BESS2 下垂曲线的斜率和空载角频率点均逐渐变大,而由于供需功率差和 BESS1 斜率未变,则 BESS1 充电功率逐渐增大,BESS2 充电功率逐渐减小, ω_B 逐渐上升如 B 点所示。当 $P_{E2} \approx 0$ 时,系统达到稳态 C 点,此时 $P_{E1} \approx \sum P_{Li} - \sum P_{DGi}$ 。由于 BESS1 充电功率始终在限定值以内,因此 ω_B 将被限定在 $[\omega_{minN}, \omega_{maxN}]$ 内,RES 始终运行于 MPP。

Case 2: 随着持续充电,系统进入工况 3,如图 5(b)所示。2 台 BESS 均处于高 SOC 区域,其下垂曲线的斜率和空载角频率点均逐渐变大, ω_B 将迅速上升并超过 ω_{maxN} ,由式(6)可知,RES 功率将逐渐减小如 B 点所示。当 $P_{E1} \approx P_{E2} \approx 0$ 时,系统达到稳态 C 点,此时 $\sum P_{Li} \approx \sum P_{DGi}$ 。

Case 3: 随着持续充电,系统进入工况 2 情况①,如图 5(c)所示。同 Case 1,BESS1 充电功率逐渐增大,BESS2 充电功率逐渐减小, ω_B 也逐渐上升,当其升至 ω_{maxN} 时,BESS1 充电功率上升至额定充电功率,系统运行于 B 点。随着 ω_B 持续上升,式(2)中 m_{pv} 积分环节开始作用,BESS1 下垂曲线斜率逐渐增加,RES 功率也逐渐减小,当 $P_{E2} \approx 0$ 且 $P_{E1} \approx -P_{EN}$ 时,系统达到稳态 C 点,此时 $-P_{EN} = \sum P_{Li} - \sum P_{DGi}$ 。随着 BESS1 持续充电,当 BESS1 也进入高 SOC 区域时,系统进入工况 3,同 Case 2 分析,系统将达到稳态 D 点。

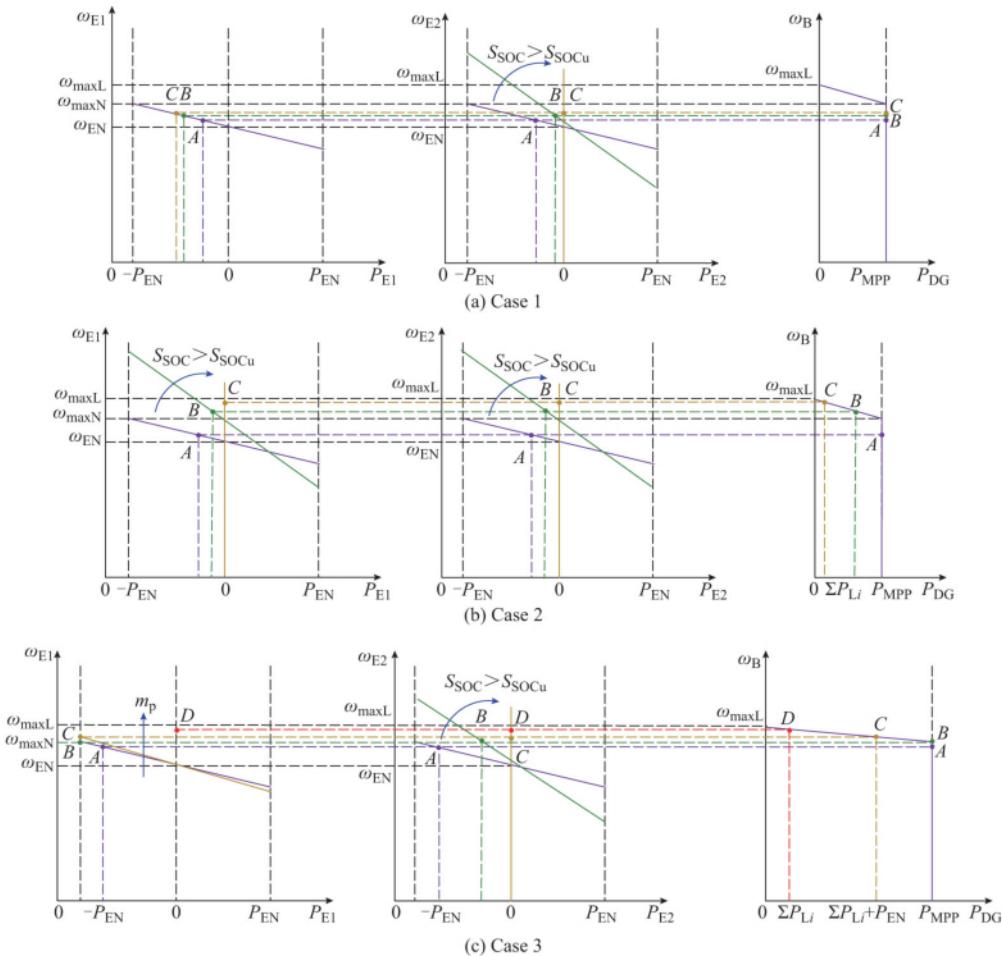


图 5 不同工况下所提控制策略协调原理分析
Fig.5 Coordinated control principle analysis of the proposed control strategy under different conditions

2.4 控制实现

基于以上分析, BESS 和 RES 的控制框图如图 6 所示。

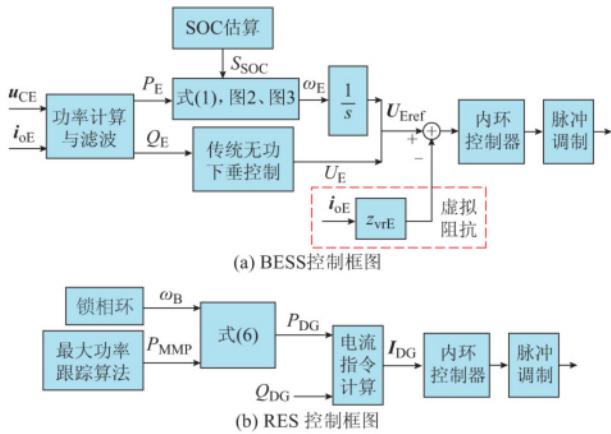


图 6 BESS 与 RES 控制框图

Fig.6 Control diagrams of BESS and RES

其中 BESS 控制只需在传统下垂控制环^[21]基

础上更改有功功率下垂部分。其中 U_{Eref} 为下垂部分输出的指令电压, U_E 为其幅值。 $u_{\text{CE}}, i_{\text{oE}}, z_{\text{vrE}}$ 分别为 BESS 电容电压、输出电流和虚拟阻抗。 Q_E 和 Q_{DG} 分别为 BESS 和 RES 的无功功率。

3 实时仿真验证

为验证所提控制策略的有效性, 基于 dSPACE 1005 平台对其性能进行实时仿真测试。该平台拓扑如附录 A 图 A1 所示, 由 2 台 BESS(10 kVA, 20 kW·h)、2 台 10 kVA 的 RES 及 1 台 90 kVA 的可调模拟负载组成, 孤岛运行。系统参数如下: 变流器容量为 10 kVA, C_{FE} 和 C_{fDG} 均为 $12 \mu\text{F}$, L_{fE} 和 L_{fDG} 均为 2 mH , L_{oE} 和 L_{oDG} 均为 0.378 mH , 各参数含义见附录 A 图 A1; 开关频率为 6 kHz , $\omega_{\text{minN}} = 2\pi \times 49.5 \text{ rad/s}$, $\omega_{\text{maxN}} = 2\pi \times 50.5 \text{ rad/s}$, $\omega_{\text{minL}} = 2\pi \times 49 \text{ rad/s}$, $\omega_{\text{maxL}} = 2\pi \times 51 \text{ rad/s}$, $\omega_{\text{EN}} = 2\pi \times 50 \text{ rad/s}$, $m_{\text{pN}} = 3.14 \times 10^{-4} \text{ rad/(s} \cdot \text{W)}$, $P_{\text{EN}} = 10 \text{ kW}$, $S_{\text{SOCu}} = 95\%$, $S_{\text{SOCh}} = 20\%$, $S_{\text{SOCh}} = 0.5\%$,

$k_{im} = 0.000\ 000\ 2$, 电压下垂曲线系数为 $0.003\ 1\text{ V/var}$, $k_{is} = 0.000\ 05$, 取值满足系统控制稳定性要求^[20,22-23]。在实际应用中, 可根据实际需要对 SOC 的限值进行优化。

3.1 Case 1

Case 1 仿真结果如附录 B 图 B1(a)所示。初始阶段 S0:2 台 RES 均运行于 MPP, 其有功功率 P_{DG1} 和 P_{DG2} 分别为 4 kW 和 3 kW。为简化分析, 采用阻性负荷, 额定条件时对应有功负荷 $P_L = 1\text{ kW}$ 。BESS1 和 BESS2 初始 SOC 分别为 94.7% 和 80%, 可见均在正常 SOC 区域。由于此时 2 台 BESS 的下垂曲线相同, 因此均分供需功率差, 其有功功率 P_{E1} 和 P_{E2} 均为 -3 kW , 可见能很好实现无互联信号线均载控制。

S1 阶段: T_1 时刻, 当 BESS1 的 SOC 达到 95%, 进入高 SOC 区域, 系统运行于工况 2 情况②, BESS1 的 ω_{SOC} 积分环节开始作用, 可见 BESS2 充电功率逐渐增大, BESS1 充电功率逐渐减小, ω_B 也逐渐上升(图中对应微电网母线频率 f_B), 一段调节时间后, 系统达到稳态, $P_{E2} \approx \sum P_{Li} - \sum P_{DGi} \approx -6\text{ kW}$; $P_{E1} \approx 0$ 。与图 5(a)分析吻合。结果表明, 基于 SOC 的恒功率 PI 下垂控制可很好地将 BESS1 充电功率限定在零值上, 防止过充。同时 RES 始终运行于 MPP, 实现了 RES 最大化利用。

3.2 Case 2

Case 2 仿真结果如附录 B 图 B1(b)所示。初始阶段 S0:2 台 BESS 的 SOC 均为 94.7%, 其他初始条件与 3.1 节相同。由于下垂曲线和初始 SOC 均相同, 2 台 BESS 以同样功率进行充电, SOC 始终保持一致。

S1 阶段: T_1 时刻, 2 台 BESS 的 SOC 均达到 95%, 系统运行于工况 3。可见, ω_B 迅速上升达到 ω_{maxN} (对应 f_B 为 50.5 Hz, 即 T_2 时刻)。

S2 阶段: 随着 ω_B 超过 ω_{maxN} , 可见 RES 功率和 BESS 充电功率逐渐减小。最终达到稳态, $P_{DG1} = 587\text{ W}$, $P_{DG2} = 440\text{ W}$, $P_{E1} \approx P_{E2} \approx 0$, 满足 $\sum P_{Li} \approx \sum P_{DGi}$, 与图 5(b)分析吻合。结果表明基于 SOC 的恒功率 PI 控制与基于 FBS 的功率下垂控制很好地进行了协调, 将 BESS 的充电功率限制在零值, 防止过充。同时仍可利用 RES 为负载供电。

3.3 Case 3

Case 3 仿真结果如附录 B 图 B1(c)所示。初始阶段 S0:2 台 RES 均运行于 MPP, 其有功功率分别为 10 kW 和 8 kW, $P_L = 1\text{ kW}$ 。2 台 BESS 的初始

SOC 分别为 90% 和 94.7%, 均分供需功率差, P_{E1} 和 P_{E2} 均为 -8.5 kW 。

S1 阶段: 在 T_1 时刻, 当 BESS2 的 SOC 达到 95%, 进入高 SOC 区域, 系统运行于工况 2 情况①, BESS2 的 ω_{SOC} 积分环节开始作用, BESS1 充电功率逐渐增大, BESS2 充电功率逐渐减小, 直至 T_2 时刻, BESS1 功率达到额定充电功率, $P_{E1} = -10\text{ kW}$, f_B 达到 50.5 Hz(表明 ω_B 达到 ω_{maxN}), 系统进入 S2 阶段。

S2 阶段: T_2 时刻, BESS1 的 m_{pv} 积分环节开始作用, 下垂曲线斜率逐渐增加, 同时基于 FBS 的功率下垂使 RES 功率逐渐下降, 随着 ω_B 进一步上升, 最终达到稳态, $P_{E1} \approx -10\text{ kW}$, $P_{E2} \approx 0$, $P_{DG1} = 6\text{ kW}$, $P_{DG2} = 5\text{ kW}$, 满足 $\sum P_{Li} - \sum P_{DGi} = 0$ 。可见, 实现了 BESS2 满充状态的零功率控制, 同时也很好地限制了 BESS1 的充电功率。

S3 阶段: T_3 时刻, 随着 BESS1 持续充电, 其 SOC 达到 95%, 系统进入工况 3, 可见 ω_B 进一步上升, RES 功率进一步下降, 最后达到稳态 $P_{E1} \approx P_{E2} \approx 0$, $P_{DG1} = 574\text{ W}$, $P_{DG2} = 459\text{ W}$, 满足 $\sum P_{DGi} \approx \sum P_{Li}$ 。与图 5(c)分析相吻合。

3.4 突增、突减负载

附录 B 图 B1(d) 和 (e) 分别给出了负载突增、突减时的仿真结果, 其分析见附录 C。仿真结果表明, 负载条件发生变化时所提控制策略均能实现较好的协调控制效果并能保证系统在各工况间平滑过渡。

4 结语

为实现微电网孤岛运行工况下安全稳定运行以及无互联信号线自治协调控制, 本文提出了一种考虑 BESS 的 SOC 的有功功率协调控制策略。所提控制策略通过基于瞬时功率的变斜率下垂控制、基于 SOC 的恒功率 PI 下垂控制、基于 FBS 的功率下垂控制集成实现了 BESS 功率限幅、BESS 满充状态时的零功率充电以及 RES 按需降功率运行。最后, 通过不同运行条件下的实时仿真验证了所提控制策略的正确性与可行性。结果表明, 所提的控制策略不仅能保有无互联信号线自治有功功率协调控制的优点, 而且还能使电池 SOC 处于安全运行范围的同时最大化 RES 的利用。另外, 该方案独立于 BESS 和 RES 内环控制器的设计, 无需更改其内环控制结构, 可简单植入传统的 BESS 或者 RES 控制。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] 李鹏,张玲,王伟,等.微网技术应用与分析[J].电力系统自动化,2009,33(20):109-115.
LI Peng, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Application and analysis of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 109-115.
- [2] 袁越,李振杰,冯宇,等.中国发展微网的目的方向前景[J].电力系统自动化,2010,34(1):59-63.
YUAN Yue, LI Zhenjie, FENG Yu, et al. Development purposes, orientations and prospects of microgrid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 59-63.
- [3] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [4] 丁明,陈忠,苏建徽,等.可再生能源发电中的电池储能系统综述[J].电力系统自动化,2013,37(1):19-25.
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25.
- [5] 王成山,肖朝霞,王守相.微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J].电工技术学报,2009,24(2):100-107.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.
- [6] GUERRERO J M, MATAS J, DE-VICUNA L G, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.
- [7] GUERRERO J M, MATAS J, DE-VICUNA L G, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [8] 姚玮,陈敏,牟善科,等.基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J].电力系统自动化,2009,33(6):77-80.
YAO Wei, CHEN Min, MOU Shanke, et al. Paralleling control technique of microgrid inverters based on improved droop method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 77-80.
- [9] 郑永伟,陈民铀,李闯,等.自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(7):6-11.
ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. A microgrid control strategy based on adaptive drooping coefficient adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6-11.
- [10] 张东,卓放,师洪涛,等.基于下垂系数步长自适应的下垂控制策略[J].电力系统自动化,2014,38(24):20-25.
ZHANG Dong, ZHUO Fang, SHI Hongtao, et al. A droop control strategy based on adaptive step length of drooping coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 20-25.
- control strategy based on drooping coefficient with adaptively changing steps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 20-25.
- [11] 赵波,王成山,张雪松.海岛独立型微电网储能类型选择与商业运营模式探讨[J].电力系统自动化,2013,37(4):21-27.
ZHAO Bo, WANG Chengshan, ZHANG Xuesong. A survey of suitable energy storage for island stand-alone microgrid and commercial operation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 21-27.
- [12] 谭兴国,王辉,张黎,等.微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J].电力系统自动化,2014,38(8):7-14.
TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, et al. Multi-objective optimization of hybrid energy storage and assessment indices in microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 7-14.
- [13] 周志超,郭力,王成山,等.风柴储生物质独立微电网系统的优化规划设计[J].电力系统自动化,2014,38(7):16-22.
ZHOU Zhichao, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Optimal planning and design of a wind/biomass/diesel/battery stand-alone microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 16-22.
- [14] 肖峻,张泽群,张磐,等.用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J].电力系统自动化,2014,38(12):19-26.
XIAO Jun, ZHANG Zequn, ZHANG Pan, et al. A capacity optimization method of hybrid energy storage system for optimizing tie-line power in microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 19-26.
- [15] JONG-YUL K, JIN-HONG J, SEUL-KI K, et al. Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(12): 3037-3048.
- [16] KANCHEV H, DI L, COLAS F, et al. Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications [J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2011, 58(10): 4583-4592.
- [17] VALENCIAGA F, PUUESTON P F. Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 398-405.
- [18] WU D, TANG F, DRAGICEVIC T, et al. Autonomous active power control for islanded AC microgrids with photovoltaic generation and energy storage system [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2014, 29(4): 882-892.
- [19] WU D, TANG F, DRAGICEVIC T, et al. Coordinated control based on bus-signaling and virtual inertia for DC islanded microgrids[J/OL]. IEEE Trans on Smart Grid. [2014-12-10]. DOI: 10.1109/TSG.2014.2387357.
- [20] WU D, TANG F, DRAGICEVIC T, et al. A control architecture to coordinate renewable energy sources and energy storage systems in islanded microgrids[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2015, 6(3): 1156-1166.
- [21] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, SAVAGHEBI M, et al. Modeling, analysis, and design of stationary reference frame

- droop controlled parallel three-phase voltage source inverters [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1271-1280.
- [22] 高范强, 王平, 李耀华, 等. 基于时变相量小信号模型的逆变器并联控制系统分析与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 75-84.
GAO Fanqiang, WANG Ping, LI Yaohua, et al. Analysis and design of for paralleled inverter system based on the small signal model using time-varying phasor [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 75-84.
- [23] 马添翼, 金新民, 黄杏. 含多变流器的微电网建模与稳定性分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 12-17.
MA Tianyi, JIN Xinmin, HUANG Xing. Modeling and

stability analysis of microgrid with multiple converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 12-17.

唐 芬(1984—),女,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:电力电子与电力传动、新能源发电、微电网系统控制。E-mail: fent@bjtu.edu.cn

姜久春(1973—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力电子及新能源技术。E-mail: jcjiang@bjtu.edu.cn

吴 丹(1986—),女,博士研究生,主要研究方向:微电网系统控制。E-mail: dwu@et.aau.dk

(编辑 蔡静雯)

Active Power Coordinated Control Considering SOC of Battery Energy Storage System

TANG Fen^{1,2}, JIANG Jiuchun^{1,2}, WU Dan³, ZHOU Xiao^{1,2}, Josep M. GUERRERO³

1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. Department of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark)

Abstract : In islanded microgrids, the traditional wireless active power coordinated control may lead to the state of charge (SOC) of the battery energy storage system (BESS) getting beyond the safe operation region if imbalance between power consumption and generation lasts too long. To address this issue, a distributed active power coordinated control strategy for multiple BESS and renewable energy source (RES) units considering SOC of BESS is proposed. By integrating variable-slope droop control based on instantaneous power, constant-power proportional-integral (PI) droop control based on SOC, and power droop control based on frequency bus signaling (FBS), an autonomous wireless coordinated control for active power is achieved. In addition, not only can the strategy proposed be easily implemented on top of the conventional BESS and RES control systems without altering the inner loop structure, but also it can keep the SOC in a safe range when efficiently utilizing the power from RES. Real-time simulation results validate the effectiveness of the control strategy proposed.

This work is supported by Application Technology Research and Engineering Demonstration Program of National Energy (No. NY20150301).

Key words : microgrid; autonomous power distribution; power droop control; coordinated control

