

基于功率交互和充放速率优化的交直流混合 微网控制策略研究

周建萍¹, 薛亚林¹, 徐 征²

(1. 上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090; 2. 北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要: 针对具有间歇性和波动性的风光分布式微源, 为保证微电网电能质量具有较高的可靠性和稳定性, 建立具有燃气轮机和混合储能系统的交直流微网结构并提出一种新型的功率分配策略, 可增强微网孤岛运行的灵活性。该控制策略将系统总功率差额进行滤波后采用蓄电池承担负载瞬间波动功率的低频分量且对其功率吞吐速率进行优化控制, 蓄电池并维持母线电压的稳定; 超级电容提供其差值功率, 同时系统能量平稳后由蓄电池承担超级电容产生能量的盈亏, 时刻维持其电压初始状态, 实现储能间的功率交互并且可有效降低对其配置设备容量的要求。分析混储系统无法长期运行时与燃气轮机的协调控制情况。最后, 通过 Matlab/Simulink 混合储能交直流微网的算例仿真, 验证所提能量管理方案的可行性和控制策略的有效性。

关键词: 微电网; 微型燃气轮机; 混合储能; 功率交互; 充放速率优化

中图分类号: TM911

文献标识码: A

0 引 言

随着化石能源的枯竭和雾霾等环境问题的压力, 大规模清洁能源的开发利用引起了社会各界的普遍关注。其中, 风力发电、光伏等分布式能源构成的微电网发电技术在我国能源战略调整、转变电力发展模式及推进节能减排中得到了快速发展与应用^[1,2]。直流微网因无需考虑频率稳定、谐波抑制及无功补偿等问题, 具有能高效消纳分布式电源、减轻电网运行冲击, 且可直接接入电动汽车充电桩等直流负荷的优点^[3-5]。但从目前发展而言, 仍无法完全取代交流发电形式, 因此交直流混合将是今后发展的主流方向^[6,7]。

交直流微网中风光分布式微源的输出功率往往具有明显的波动性、间歇性和随机性等缺点, 对电网的供电质量和安全稳定运行带来不利影响。通常在微网中配置一定容量的储能装置^[8], 利用蓄电池的高能量密度、工作时间和超级电容高功率

密度、响应迅速、循环寿命长等优点构成混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)。

文献[9]采用了不同电压等级的双直流母线混合储能协调控制, 由蓄电池维持超级电容端电压并进行间接功率补偿进而实现母线间功率交换, 但该策略是以牺牲一侧母线电压稳定来满足另一侧功率平衡目标的; 文献[10]以燃气轮机和蓄电池组成储能装置, 实现了两种储能之间的协调切换, 且当燃气轮机因故障退出运行时, 由蓄电池承担所有功率缺额, 未考虑其功率吞吐速率的控制, 降低了其使用寿命。文献[11~13]利用低通滤波器平滑输出功率, 由超级电容承担高频波动, 蓄电池平抑低频功率的策略。文献[14, 15]提出利用电流多滞环对蓄电池充放电电流进行恒定控制, 提高了系统充放功率的控制精度, 但该方法同时也导致了蓄电池充放过程中电流的瞬间增大和降落, 仍对蓄电池的功率吞吐造成一定冲击, 不利于延长其使用寿命且未实现储能两者之间的功率交换问题。文献[16]提

收稿日期: 2016-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(61275038); 上海市重点科技攻关计划(14110500700; 15160500800); 上海市科学技术委员会工程技术研究中心项目(14DZ2251100)

通信作者: 周建萍(1978—), 女, 博士、副教授, 主要从事分布式发电与微电网的运行与仿真方面的研究。zhoujianping@shiep.edu.cn

出微电网在孤岛模式运行下混合储能采取变下垂系数的控制方法,实时修改负荷功率在双储能设备之间的比例系数。同样未考虑超级电容和蓄电池的功率交换情况且混合储能系统容量较小,无法在长时间内保证微电网持续稳定供电。

针对风光分布式微源输出功率的间歇性及波动性问题,本文提出含有燃气轮机与混合储能的交直流微网协调控制策略。微网中负荷功率发生波动时,系统差额功率的平滑部分由蓄电池承担且对其功率吞吐的速率进行限制优化,防止充放电的突增及突减造成冲击影响;超级电容平抑其差值功率。同时系统功率恢复平衡时,超级电容进行充放电以补偿在此过程能量产生的盈亏,可实现混储之间的功率交换且充分发挥超级电容循环寿命长的优势,降低微网对其容量配置的要求。燃气轮机作为混储系统的备用装置,采用下

垂协调策略控制交直流母线功率平衡。最后,在仿真平台中建立相关仿真模型,验证所提控制策略的有效性,优化蓄电池充放电的工作性能,延长其使用寿命。

1 系统结构分析

含燃气轮机与混合储能系统的交直流微网结构如图1所示。微网由主电路和控制电路两部分构成。主电路包含风、光分布式微源,超级电容、蓄电池组成混合储能系统,微型燃气轮机,负荷及相关功率变换器等。风力机经过整流设备与光伏单元通过单向 Boost 最大功率追踪后连入 800 V 直流侧母线;蓄电池和超级电容各自通过双向 DC/DC 变换器后经逆变器接入交流母线;交直流母线间由双向 DC/AC 逆变器相连,从而实现两侧负荷的功率交换。

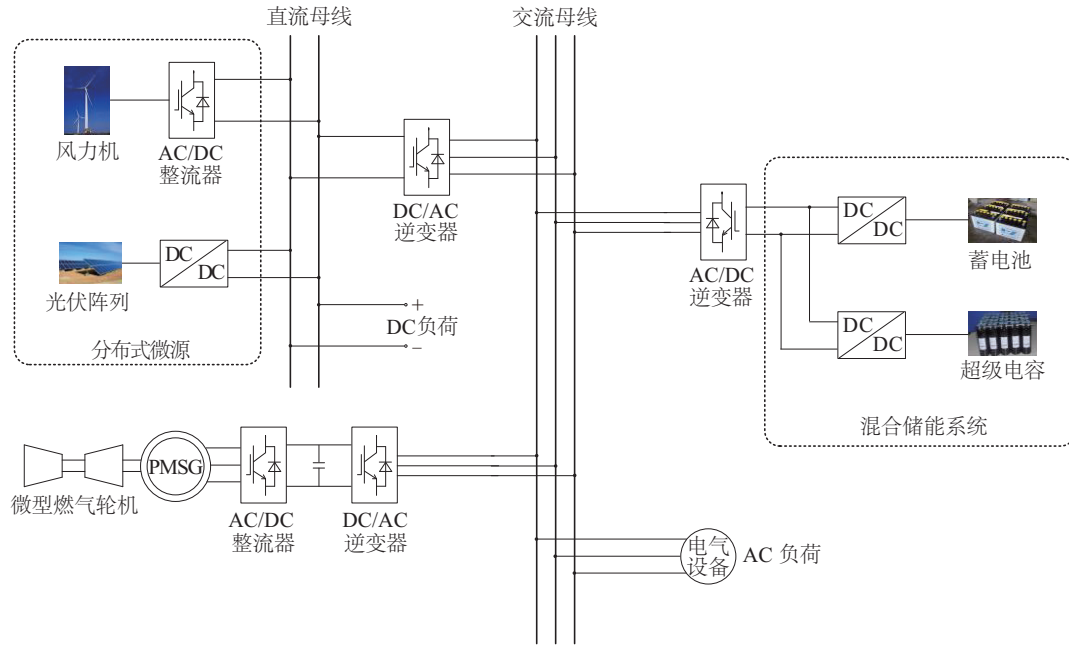


图1 交直流混合微网运行结构框图

Fig. 1 Structure diagram of AC/DC hybrid micro-grid

光伏单元输出电压一般较低且无法满足直流侧负荷端电压,为实现直流侧稳压及光能的最大利用效率,通常对其进行最大功率点跟踪控制,本文Boost变换器采用导纳增量法予以实现^[17]。蓄电池和超级电容均通过变换器并联连接于交流侧,增强了系统运行的可靠性与灵活性,提高了母线电压的稳定性。混储系统Buck/Boost功率变换器电路结

构如图2所示,采用应用较为广泛的脉宽调制(PWM)互补式控制技术^[18]。图2中, U_B 、 U_{sc} 为蓄电池和超级电容的等效电压; $L_{battery}$ 、 C_B 和 L_{sc} 、 C_{sc} 为蓄电池和超级电容的滤波电感及滤波电容; S_1 、 S_2 为控制其功率交换和稳定电压的功率开关管; C_{dc} 、 U_{dc} 为直流滤波电容和电压; $I_{battery}$ 、 I_{sc} 为蓄电池和超级电容的输出电流; I_1 、 I_o 为混合储能系统稳

压前输出电流和稳压后输出电流; r_b 、 r_{L_b} 、 r_{sc} 、 $r_{L_{sc}}$ 为蓄电池、滤波电感的内阻。

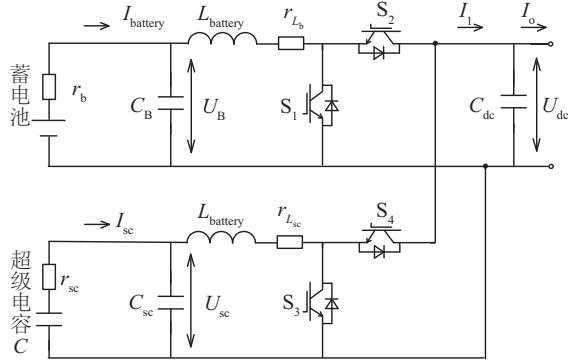


图2 混合储能系统双向 Buck/Boost 等效电路拓扑结构

Fig. 2 The bi-directional Buck/Boost equivalent circuit topology structure of hybrid energy storage system

2 功率变换器的建模与控制

2.1 双向 Buck/Boost 变换器建模

超级电容与蓄电池组成的混储系统是微电网实现母线电压稳定及功率平衡的关键,其通过双向半桥变换器进行并联,因此 Buck/Boost 功率变换器的建模控制是实现平抑功率波动和系统能量管理的核心。

混合储能系统 Buck/Boost 功率变换器并联结构如图 2 所示,考虑到其控制开关频率远大于微电网的运行状态变化,因此其输出功率的瞬间近似认为是恒定的。超级电容与蓄电池采用互补式 PWM 状态空间平均法建模^[19]。文中以蓄电池参数为例进行设计, i_o 为负载侧输出电流;取 S_1 占空比为 d , 则 S_2 占空比为 $1-d$; 蓄电池电感电流 i_L 、负载电压 u_{dc} 为状态变量, 蓄电池电压 u_B 、负载电流 i_o 为输入变量。变换器分别运行在 Boost 和 Buck 模式时如式(1)、式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{u}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_b + r_{L_b}}{L_{\text{battery}}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_{\text{battery}}} \\ -\frac{1}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ u_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{u}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_b + r_{L_b}}{L_{\text{battery}}} & -\frac{1}{L_{\text{battery}}} \\ \frac{1}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_{\text{battery}}} \\ -\frac{1}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ u_B \end{bmatrix} \quad (2)$$

则功率变换器在单开关周期内的平均值为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{u}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_b + r_{L_b}}{L_{\text{battery}}} & -\frac{1-d}{L_{\text{battery}}} \\ \frac{1-d}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_{\text{battery}}} \\ -\frac{1}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ u_B \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此可得电感电流及功率平衡为:

$$i_L = \frac{u_B - (1-d)u_{dc}}{r_b + r_{L_b}} \quad (4)$$

$$u_B i_L - (r_b + r_{L_b}) i_L^2 = u_{dc} i_o \quad (5)$$

当 $i_L > 0$, 即 $d > 1 - u_B/u_{dc}$ 时蓄电池释放功率, 补充网内功率缺额; 当 $i_L < 0$, 即 $d < 1 - u_B/u_{dc}$ 时蓄电池吸收功率, 平抑网内剩余功率。在输入变量和状态变量的稳定工作值附近可添加小信号变化分量, 则有: $u_B = U_B + u_B \hat{i}_o(t)$, $i_o = I_o + i_o \hat{i}_o(t)$, $i_L = I_L + i_L \hat{i}_L(t)$, $u_{dc} = U_{dc} + u_{dc} \hat{i}_L(t)$ 。由稳定工作点(设变量为 X)条件: $\dot{X} = AX + BU = 0$ 及将上述小信号变化分量代入式(3)及式(5), 化简可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{u}_{dc} \end{bmatrix} = -A^{-1}BU = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-d} & 0 \\ -\frac{r_b + r_{L_b}}{(1-d)^2} & \frac{1}{1-d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ u_B \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L(t) \\ \hat{u}_{dc}(t) \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} C_{dc}U_{dc}s + (1-d)I_L \\ (1-d)U_{dc} - I_L(r_b + r_{L_b}) - I_L L_{\text{battery}}s \end{bmatrix}}{L_{\text{battery}}C_{dc}s^2 + (r_b + r_{L_b})C_{dc}s + (1-d)^2} \hat{d}(t) + \dots \quad (7)$$

$$\frac{\begin{bmatrix} 1-d & C_{dc}s \\ -[L_{\text{battery}}s + (r_b + r_{L_b})] & 1-d \end{bmatrix}}{L_{\text{battery}}C_{dc}s^2 + (r_b + r_{L_b})C_{dc}s + (1-d)^2} \begin{bmatrix} \hat{i}_o(t) \\ \hat{u}_B(t) \end{bmatrix}$$

式中, A 、 B ——已知参数矩阵; U ——混储系统输出电流和蓄电池电压组成的矩阵。

因此, 由式(7)可得出混储系统变换器分别在 Buck/Boost 状态下小信号状态空间平均法从输入变量或控制变量到状态变量的传递函数。

2.2 蓄电池/超级电容系统控制

蓄电池由于其功率密度低、响应速度较慢、循环寿命短但能量密度大的特点, 因此承担功率波动的平滑部分且时刻维持混合储能系统直流侧的电压稳定; 在小信号状态空间模型中, 由于恒阻抗负载易导致变换器控制系统的不稳定性^[20], 因此文中以负载电流为输入变量进行建模。由式(7)可得功率变换器在 Buck/Boost 状态下的控制传函分别为:

式中, u_o ——逆变器输出端电压; i_l ——滤波器输出端电流; ω ——交流母线电压角频率。

在逆变内环控制器中均采用双环控制且 PI 控制调节能稳定逆变器的输出端口电压, 电流内环通过 PI 调节实现电流的无静差跟踪控制, 提高响应速度和精细调节程度。

电流内环的电压调节方程并代入式(12)中, 则有:

$$\begin{cases} u_{od} = (k_p + k_i \frac{1}{s})(i_{o1dref} - i_{o1d}) + u_{ld} - \omega L_f i_{oq} \\ u_{oq} = (k_p + k_i \frac{1}{s})(i_{o1qref} - i_{o1q}) + u_{lq} + \omega L_f i_{od} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{od}}{dt} = (k_p + k_i \frac{1}{s})(i_{o1dref} - i_{o1d}) \\ L_f \frac{di_{oq}}{dt} = (k_p + k_i \frac{1}{s})(i_{o1qref} - i_{o1q}) \end{cases} \quad (14)$$

式中, k_p 、 k_i ——PI 调节器参数; i_{o1dref} 、 i_{o1qref} ——滤波器电容支路 dq 轴分量参考值。

电压外环的电流调节方程并代入式(12)中, 则有:

$$\begin{cases} i_{o1d} = (k_p + k_i \frac{1}{s})(u_{ldref} - u_{ld}) - \omega C_f u_{lq} \\ i_{o1q} = (k_p + k_i \frac{1}{s})(u_{lqref} - u_{lq}) + \omega C_f u_{ld} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} C_f \frac{du_{ld}}{dt} = (k_p + k_i \frac{1}{s})(u_{ldref} - u_{ld}) \\ C_f \frac{du_{lq}}{dt} = (k_p + k_i \frac{1}{s})(u_{lqref} - u_{lq}) \end{cases} \quad (16)$$

由式(14)可知, 滤波电感 dq 轴电压对 qd 轴电流 $\omega L_f i_{oq}$ 、 $\omega L_f i_{od}$ 实现了解耦补偿控制, 式(16)电容 dq 轴电流对 qd 轴电压 $\omega C_f u_{lq}$ 、 $\omega C_f u_{ld}$ 实现了解耦补偿控制。

当混合储能系统出现故障或其荷电状态缺失时, 由燃气轮机对系统提供不平衡功率的补偿供给与支持。微型燃气轮机的装机容量相对较大, 为提高系统运行的可靠性和实现其“即插即用”的特性, 采用了下垂控制策略, 其接口逆变器外环下垂控制策略原理结构如图 6 所示。图 6 中采用 P - f 和

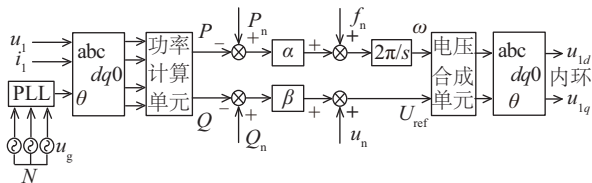


图6 燃气轮机外环下垂协调控制原理图

Fig. 6 The droop coordinated control principle diagram of gas turbine outer loop

Q - U 的下垂控制策略, 入交流母线侧电压和电流经派克变换、功率计算后与额定功率 P_n 、 Q_n 进行下垂协调控制, 最后与额定电压和频率得到差值参考量送入逆变器内环控制器, 其中燃气轮机内环控制器同样适用于上述 V/f 解耦补偿控制。

3 混合储能协调控制策略

微网系统中由于分布式微源具有明显的功率波动及间歇性, 为实现交直流母线电压稳定及功率平衡, 采用蓄电池和超级电容的混合储能系统结构。超级电容的加入能显著改善单一蓄电池储能时对负载功率波动造成充放电的频繁切换现象, 延长其使用寿命。但两者科学合理的协调控制策略是发挥各自储能优势, 实现微网稳定运行、抑制功率波动的关键。

在图 1 所示的交直流混合微网运行结构中, 蓄电池在维持混储直流侧电压稳定的同时, 需承担微网中总功率差额的低频平滑部分; 超级电容由于具有快速充放电的能力, 平抑剩余差值功率部分, 其功率分配如图 7 所示。图 7 中, P_{source} 、 P_{load} 为分布式微电源总输出功率及负荷功率; LPF 为低通滤波器; P_B 、 P_{sc} 为蓄电池和超级电容需平抑功率; $i_{battery}$ 、 i_{sc} 为蓄电池和超级电容的控制电流。

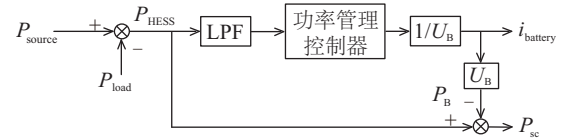


图7 混合储能系统(HESS)功率分配流程图

Fig. 7 Flow chart of HESS power distribution

由于本文中超级电容在进行功率波动平抑过程中充放电所产生的能量盈亏, 最终由蓄电池进行补充或吸收, 维持其初始电压, 极大降低了配置容量, 因此微电网混合储能系统的协调控制只需考虑蓄电池的荷电状态, 其协调控制策略流程如图 8 所示。

4 算例仿真与分析

为验证所提混合储能系统协调控制策略的有效性和正确性, 在仿真软件平台中建立图 1 所示的微网系统。风光分布式微源交直流母线电压有效值分别为 800 和 220 V, 风力发电单元采用直驱式永磁

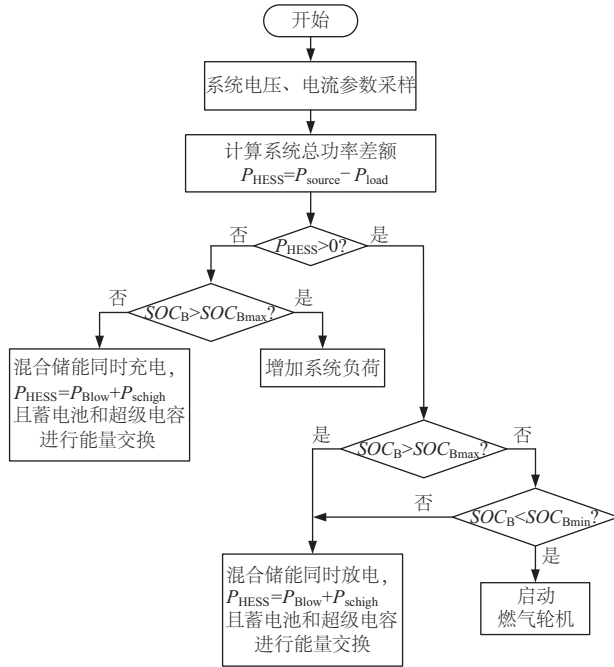


图8 微电网能量管理协调控制流程图

Fig. 8 Flow chart of the micro-grid energy management coordination and control

同步发电机,额定功率 $P_{wind} = 5 \text{ kW}$, 风力机功率系数 $C_p = 0.48$; 太阳能电池单元 MPPT 参数为: 最大功率点电压 $U_m = 36.5 \text{ V}$, 最大功率点电流 $I_m = 5.2 \text{ A}$, 开路电压 $U_{oc} = 45.5 \text{ V}$, 短路电流 $I_{sc} = 5.6 \text{ A}$, 标准光照条件下的电压电流变化系数为 $\alpha = 0.00672$, $\beta = 0.2275$, 太阳能电池模块串并联各 4 个, 额定功率 $P_{pv} = 3 \text{ kW}$ 。分布式微源侧 LCL 滤波器参数为 $L_1 = 4 \text{ mH}$, $C = 5 \text{ } \mu\text{F}$, $L_2 = 3 \text{ mH}$ 。

蓄电池额定电压及容量分别为 $U_{bref} = 400 \text{ V}$, $S = 10 \text{ Ah}$, 初始荷电状态 $SOC_{binitial} = 50\%$ 且运行范围为 $5\% \sim 95\%$; 超级电容额定容量及工作电压分别为 $C = 45 \text{ F}$, $U_{scref} = 400 \text{ V}$, 等效内阻 $2.1 \times 10^{-3} \Omega$, 初始电压 360 V 。燃气轮机下垂系数 $\alpha = 1 \times 10^{-5}$, $\beta = 3 \times 10^{-4}$; 额定功率分别为 $P_{Gas} = 20 \text{ kW}$, $Q_{Gas} = 10 \text{ kvar}$ 。

微网中负载突增时储能系统出力波形曲线如图 9 和图 10 所示。风速变化曲线值在 11 m/s 附近波动, P_{Load} 为微网总负荷功率, P_{HESS} 为混合储能系统输出功率。0.00~0.25 s 为微源启动过程, 此时负载功率大于微源功率, 混合储能瞬时出力, 频率波动稳定在 0.4% 以内。1.00 s 时负载由 10 kW 切换为重载 17.5 kW , 此时 P_{HESS} 也瞬时增大。超级电容承担不平衡功率的高频波动部分, 其输出电流由 -4 A 快速

升至 25 A 且电流波动较大, 即时响应; 蓄电池承担不平衡功率的平滑部分, 其输出电流缓慢平稳增大, 此时输出电流由 7 A 缓缓增至 26.5 A 且电流波动较小。1.20 s 时, 系统功率达到平稳状态, 超级电容开始充电, 以补充在放电过程中的能量损失。1.00 s 时, 直流侧电压跌落 22 V (波动率 2.75%) 后迅速回到额定值; 交流母线电压波形基本不受影响, 频率最大波动为 0.12% 。

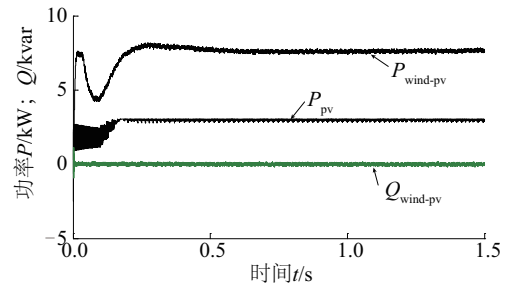
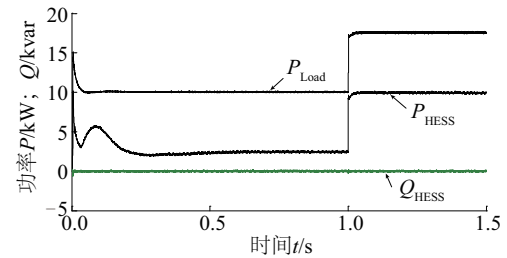
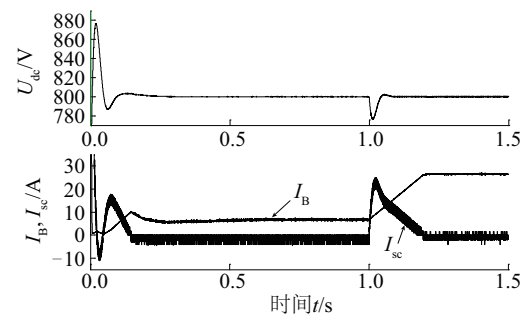


图9 风光分布式微源输出功率

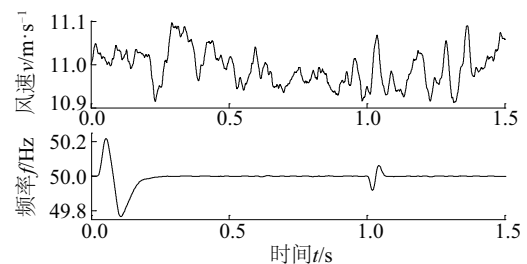
Fig. 9 The output power of distributed micro-power source



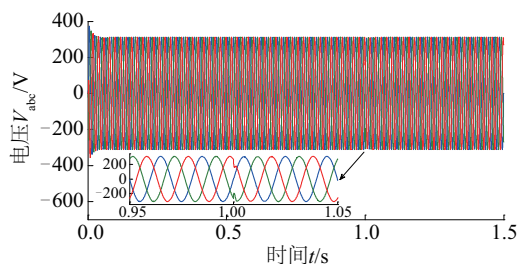
a. 负载和储能系统功率



b. 直流电压和储能充放电电流



c. 风速曲线和频率

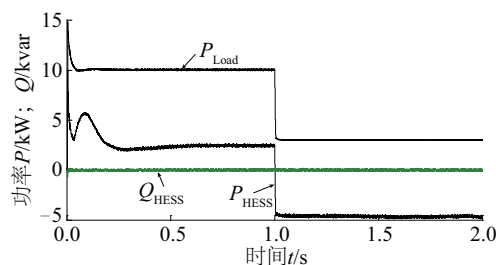


d. 交流侧母线电压

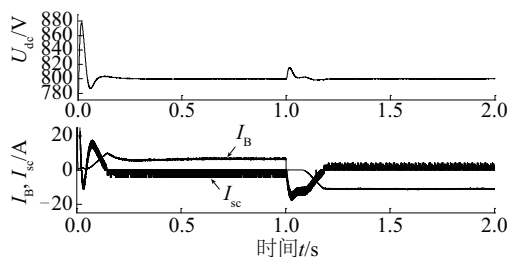
图 10 微网负载突增时波形曲线

Fig. 10 The waveform curve when the micro-grid load suddenly increases

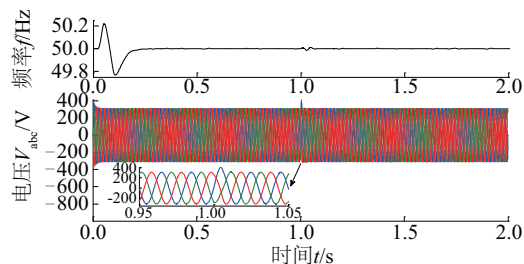
微网中负载突减时储能系统出力波形曲线如图 11 所示。1.00 s 时负荷由 10 kW 切换到轻载 3 kW, 此时分布式微源输出功率大于负载损耗, 网内出现剩余功率, 混储系统由放电切换为充电状态, 实现系统能量平衡。超级电容输出电流由 -4 A 迅速降至 -18 A; 蓄电池输出电流由 0 A 逐渐降至 -11.5 A, 很大程度上缓解了突变功率对蓄电池的冲击与损害。1.18 s 时, 系统功率再次达到平衡状态, 超级电容释放突变功率平抑过程吸收的能量。其中, 直流母线电压上升 15.5 V (波动率 1.94%) 后迅速回到额定值; 频率最大波动为 0.0332%; 由此可知, 混合储能系统可有效平抑微网内功率波动、维持直流侧母线电压稳定, 使其符合供电电能质量。



a. 负载和储能系统功率



b. 直流电压和储能充放电电流

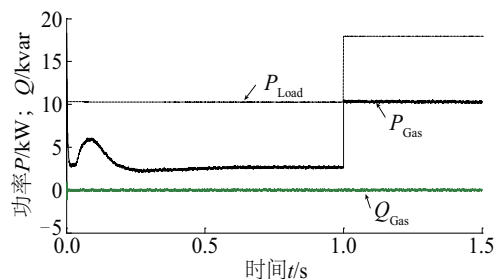


c. 交流侧母线电压和频率

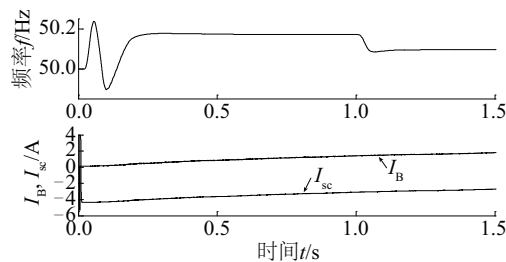
图 11 微网负载突减时波形曲线

Fig. 11 The waveform curve when the micro-grid load suddenly reduces

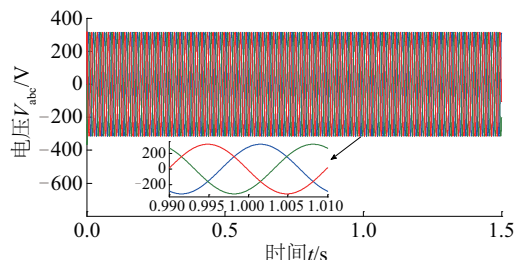
当混储系统荷电状态缺失时, 启动燃气轮机平衡网内功率。图 12 中混储系统不出力, 燃气轮机能平稳跟踪突增负荷, 且功率突变瞬间, 交流母线电压波形基本不变; 频率在允许波动范围内, 符合 GB/T 15945—2008 电能质量频率偏差标准。



a. 负载和燃气轮机功率



b. 交流母线频率和储能系统电流



c. 交流侧母线电压

图 12 燃气轮机工作时波形曲线

Fig. 12 Gas turbine working waveform curve

5 结 论

本文采用混合储能系统和燃气轮机对风光分布式微源的间歇性和波动性进行平抑,增强了系统运行灵活性和电能质量。针对蓄电池多滞环电流控制策略等易造成充放电流的瞬间增大和降落,仍对蓄电池吞吐功率产生冲击影响,因此将蓄电池功率交换速率进行限制优化;超级电容承担高频波动功率后由蓄电池进行能量补偿,实现了储能单元间的功率交互,且充分发挥了超级电容高循环寿命的特点,有效降低了系统对其配置容量的要求。最后,仿真结果验证混储系统和燃气轮机的协调控制策略,有效平抑了微网功率波动,维持了交直流母线电压水平,提高了供电电能质量。

[参考文献]

- [1] 国家能源局. 国家能源局关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见[EB/OL]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/-201507/t20150722_1949.htm, 2015-09-29.
- [1] National Energy Administration. Guidance on the promotion of new energy based micro-grid demonstration projects construction [EB/OL]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/-201507/t20150722_1949.htm, 2015-09-29.
- [2] 任洛卿, 白泽阳, 于昌海, 等. 风光储联合发电系统有功控制策略研究及工程应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 105—111.
- [2] Ren Luoqing, Bai Zeyang, Yu Changhai, et al. Research on active power control strategy for wind/photovoltaic/energy storage hybrid power system and its engineering application[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(7): 105—111.
- [3] Chen Dong, Xu Lie. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1897—1905.
- [4] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2—16.
- [4] Li Xialin, Guo Li, Wang Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: An overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2—16.
- [5] 孟润泉, 刘家赢, 文波, 等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2168—2193.
- [5] Meng Runquan, Liu Jiaying, Wen Bo, et al. Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2186—2193.
- [6] Hu Wenyan, Chen Hongkun, Yang Xiaonan, et al. Control strategy of the bi-directional converter for hybrid AC/DC microgrid [A]. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) [C], Brisbane, QLD, Australia, 2015, 1—5.
- [7] Nejatkhan F, Li Yunwei. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072—7089.
- [8] 周念成, 邓浩, 王强钢, 等. 光伏与微型燃气轮机混合微网能量管理研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 74—84.
- [8] Zhou Niancheng, Deng Hao, Wang Qianggang, et al. Energy management strategy of PV and micro-turbine hybrid micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 74—84.
- [9] 任春光, 赵耀民, 韩肖清, 等. 双直流母线直流微电网的协调控制[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2166—2173.
- [9] Ren Chunguang, Zhao Yaomin, Han Xiaoqing, et al. Coordination control of DC microgrid with two DC buses [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2166—2173.
- [10] 白园飞, 程启明, 吴凯, 等. 独立交流微电网中储能电池与微型燃气轮机的协调运行[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 65—70.
- [9] Bai Yuanfei, Cheng Qiming, Wu Kai, et al. Coordinated of storage battery and microturbine in islanded AC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 65—70.
- [11] 吴雨, 潘文霞, 冯蒙霜, 等. 基于混合储能的微电网功率控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 109—114.
- [11] Wu Yu, Pan Wenxia, Feng Mengshuang, et al. Power control strategy for microgrid based on hybrid energy

- storage system[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(2): 109—114.
- [12] 高 尚, 祁新春, 谢 涛, 等. 共直流母线光伏-混合储能发电系统及其双重滤波优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 92—97.
- [12] Gao Shang, Qi Xinchun, Xie Tao, et al. Common DC bus based on PV-hybrid energy storage power system and optimal control using double filters[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 92—97.
- [13] 程志江, 李永东, 谢永流, 等. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2739—2745.
- [13] Cheng Zhijiang, Li Yongdong, Xie Yongliu, et al. Control strategy for hybrid energy storage of photovoltaic generation microgrid system with super capacitor[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2739—2745.
- [14] 王海波, 杨 秀, 张美霞. 平抑光伏系统波动的混合储能控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2452—2458.
- [14] Wang Haibo, Yang Xiu, Zhang Meixia. A control strategy of hybrid energy storage system capable of suppressing output fluctuation of photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2452—2458.
- [15] 田慧雯, 李咸善, 陈 铁, 等. 基于混合储能的光伏微网孤网运行的综合控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 122—128.
- [15] Tian Huiwen, Li Xianshan, Chen Tie, et al. Comprehensive control strategy of hybrid energy storage-based photovoltaic island microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 122—128.
- [16] 张继红, 贺智勇, 李 华, 等. 基于孤岛模式的双储能微电网下垂协调控制及仿真[J]. 太阳能学报, 2015, 36(1): 146—153.
- [16] Zhang Jihong, He Zhiyong, Li Hua, et al. Droop coordinated control and simulation based on islanded microgrid of dual energy storage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(1): 146—153.
- [17] 尤 鋈, 郑建勇. 基于模糊PI调节 Boost 电路的光伏系统最大功率点跟踪控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 94—98.
- [17] You Jun, Zheng Jianyong. MPPT of photovoltaic system with Boost circuit based on fuzzy PI control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 94—98.
- [18] 张国驹, 唐西胜, 周 龙, 等. 基于互补PWM控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15—21.
- [18] Zhang Guojun, Tang Xisheng, Zhou Long, et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bi-directional converter in supercapacitor energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15—21.
- [19] 张卫平, 陈亚爱, 关晓菡. 开关变换器的建模与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006, 15—19.
- [19] Zhang Weiping, Chen Yaai, Guan Xiaohan. Modeling and Control of switching Converter[M]. Beijing: China Power Press, 2006: 15—19.
- [20] Grigore V, Hatonen J, Kyyra J, et al. Dynamics of a buck converter with a constant power load[A]. IEEE Power Electronics Specialists Conference[C], Fukuoka, Japan, 1998.

RESEARCH ON AC/DC HYBRID MICRO-GRID CONTROL STRATEGY BASED ON POWER INTERACTION AND CHARGE-DISCHARGE RATE OPTIMIZATION

Zhou Jianping¹, Xue Yalin¹, Xu Zheng²

(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Key Laboratory of Luminescence and Optical Information Technology of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at distributed wind and PV micro-sources with intermittence and fluctuation, in order to ensure the high reliability and stability of micro-grid power quality, an AC/DC micro-grid structure with gas turbine and hybrid energy storage system is established and a new power allocation strategy is proposed to enhance the flexibility of micro-grid island operation. The control strategy will be used to filter the total power difference of the system, uses the battery to bear the low frequency component of the instantaneous fluctuation power of the load, and optimally control the power throughput rate and maintain the stability of the bus voltage. The super-capacitor provides its differential power. At the same time, the battery bears the profit and loss of the energy generated by super-capacitor after the energy of the system is stable, maintains the initial state of the voltage at all times to realize the power interaction between the energy storage and effectively reduce the capacity of the configured device. The coordinated control of the gas turbine with the mixed storage system which cannot run for a long time is analyzed. Finally, through the simulation of AC/DC microgrid with Matlab/Simulink hybrid energy storage, the feasibility of the proposed energy management scheme and the effectiveness of the control strategy are verified.

Keywords: micro-grid; micro gas turbine; hybrid energy storage; power interaction; optimization of charging and discharging rate