

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200398

基于分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的并网点电压主动调控技术研究

余豪杰¹, 李官军^{1,2}, 杨波¹, 朱少杰¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司(南京), 江苏 南京 210003;

2. 江苏省储能变流及应用工程技术研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要: 为改善配电网末端电能质量, 提高并网点电压稳定性, 提出了一种基于分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的并网点电压主动支撑控制策略。相比于传统电压调节控制方式, 该控制策略能够充分发挥飞轮储能高频次充放电特性, 根据电压偏差大小自适应调整联合发电系统有功/无功输出, 稳定并网点电压。同时该控制策略将并网点功率因数作为考虑因素, 引入控制算法当中, 能够在进行功率控制的同时优化并网点功率因数。为验证所提控制策略的可行性, 搭建了一套含 50 kW 光伏、100 kW 飞轮储能在内的实验测试平台。实验结果表明分布式光伏/飞轮储能系统能够根据电压波动大小自动调整有功/无功输出, 改善并网点电能质量。

关键词: 飞轮储能; 电压主动支撑; 电压偏差; 功率因数优化; 分布式光伏

Research on the active control technology of grid voltage based on a distributed photovoltaic/flywheel energy storage combined generation system

YU Haojie¹, LI Guanjun^{1,2}, YANG Bo¹, ZHU Shaojie¹

(1. China Electric Power Research Institute Company Ltd., Nanjing 210003, China; 2. Jiangsu Engineering Technology Research Center for Energy Storage Conversion and Application, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to improve the power quality at the end of a distribution network and enhance the voltage stability of the parallel grid, this paper proposes an active voltage support control strategy based on a distributed photovoltaic/flywheel energy storage combined generation system. Compared with the traditional voltage regulation control method, the control strategy can give full play to the high frequency charging and discharging characteristics of flywheel energy storage, adjust the active/reactive power output of the combined generation system adaptively according to the magnitude of voltage deviation, and stabilize the grid point voltage. At the same time, the control strategy takes the power factor of the grid point as a consideration, and introduces a control algorithm, which can be used in the same power control. The power factor of the parallel dot is optimized. In order to verify the feasibility of the proposed control strategy, a set of experimental test platforms including 50 kW photovoltaic and 100 kW flywheel energy storage is built. The experimental results show that the distributed photovoltaic/flywheel energy storage system can automatically adjust the active/reactive power output according to the voltage fluctuation, and improve the power quality of parallel outlets.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905500).

Key words: flywheel energy storage; voltage active support; voltage deviation; power factor optimization; distributed photovoltaic

0 引言

大力发展风能、太阳能等可再生能源是我国调

整能源结构、实现节能减排的重要战略举措, 截至 2017 年底我国光伏装机容量已达 137 GW, 相比于 2016 年增长 78%。随着分布式新能源装机比例不断增加, 不但改变了电力系统的网络结构, 其本身的波动性给电网带来的影响也越发明显, 尤其在我国

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905500)

西北地区, 风电、光伏渗透率较高, 配电网网架结构较弱, 常出现电压波动等问题。与此同时, 随着我国经济发展, 在配电网末端负荷类型不断增加, 非线性负荷、冲击性负荷不断增多, 在其启动过程中对配电网冲击较大, 影响其他用电设备的使用。为解决光伏出力和用电负荷引起的并网点电压波动、偏差等问题, 目前多采用电能质量治理装置或在并网点处配置储能系统, 并且有相关协调控制技术。文献[1]中采用光储与配电网静止同步补偿器协同运行的方法来解决并网点电能质量问题, 该方法未能充分发挥光伏逆变器和储能系统无功输出能力, 同时增加了系统运行成本。文献[2]中针对平滑功率波动、跟踪计划出力和电网调频三种不同应用需求提出了考虑储能荷电状态风光储协调控制策略; 文献[3]中给出了光储发电系统底层装置并网控制策略和以削峰填谷为目标的能量管理控制策略; 文献[4]中从平滑功率波动、削峰填谷和离网支撑三个方面阐述了储能系统在光储微电网中所发挥的重要作用, 同时给出了相关变流器的拓扑结构和并离网控制策略。但是文献[2-4]中均未对并网点电压波动问题提出解决方案。文献[5]中给出了直流汇集情况下交、直流侧的协调控制方法, 但是并未对光伏出力情况和储能荷电状态进行综合考虑, 难以满足不同运行工况下的应用需求; 文献[6]中提出了一种三相交错并联的变流器拓扑, 采用电压、电流双闭环控制, 其中电压外环采用非线性微分平滑控制方法, 能够实现直流母线的稳定控制, 但是文中并未涉及交流侧控制策略; 文献[7]中将设备运行工况分为并网、处理扰动和紧急故障三种, 对于不同运行工况设定了相应的电压阈值, 基于此文献中提出了一种分布式就地自适应电压控制策略, 能够充分发挥光伏逆变器的剩余容量对并网点进行无功支撑, 但是由于无储能系统的接入, 对于有功引起的电压波动无法进行有效控制。此外文献[1-7]中所采用的均为电化学储能系统, 但是电化学储能系统受本身固有特性限制存在以下几方面不足^[8-14]: 1) 充放电次数有限(能量型储能系统约为 2 000~3 000 次, 功率型储能系统约为 10 万次); 2) 荷电状态难以估算, 尤其在长时间运行后难以准确计算系统剩余容量; 3) 对周围环境要求高, 在高寒、湿热等恶劣环境下使用时需增加辅助设备; 4) 回收难度大, 电化学储能系统含有大量锌、铅、汞、锰等重金属, 达到寿命周期后难以进行回收, 容易对环境产生二次污染。

为解决分布式光伏大规模接入以及冲击性负荷引起的并网点电压波动/越限等问题, 本文提出了一种基于分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的配电网

末端电压稳定控制技术。联合发电系统采用直流汇集方式, 在直流侧采用变系数下垂控制方式, 通过飞轮储能控制直流母线电压同时平抑分布式光伏的波动。交流侧采用并网点电压主动控制技术, 综合分析光伏、飞轮储能当前的运行状态, 结合当前负荷的用电信息不断调整系统的有功、无功出力, 实现对并网点电压的主动控制, 提高配电网末端供电质量。

1 联合发电系统拓扑

分布式光伏、飞轮储能联合系统根据汇集方式可分为交流汇集和直流汇集两种。交流汇集方式如图 1 所示, 光伏、储能系统各自通过 DC/AC 变流器接入交流母线^[15-16]。该方式下为满足并网点的频率/电压要求, 需对各个 DC/AC 变换器进行协调控制, 控制算法较为复杂^[17-18]。同时采用多套 DC/AC 变换器系统成本较高, 体积较大。但是各分布式光伏和储能单元能够进行独立配置和运行, 便于并联扩容, 更适用于兆瓦级以上大容量系统。直流汇集方式如图 2 所示, 分布式光伏、储能单元通过各自经 DC/DC 和 AC/DC 变换接入直流母线, 随后经 DC/AC 变换接入交流母线。该方式仅需通过储能系

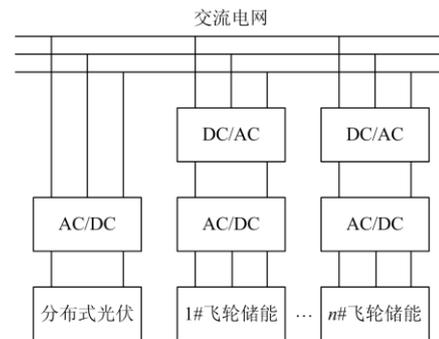


图 1 交流汇集方式

Fig. 1 AC collection mode

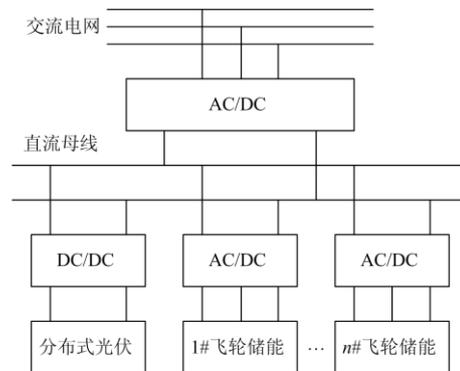


图 2 直流汇集方式

Fig. 2 DC collection mode

统维持直流母线电压稳定,即可实现平抑光伏出力波动,无需进行交流侧的协调控制,对电网响应速度更快^[19]。同时交流侧仅一套 DC/AC,系统体积更小,成本更低。但是输出容量受交流侧 DC/AC 限制,不易扩容,更适用于兆瓦级以下小容量系统^[20]。本文中采用直流汇集方式。

2 联合发电系统并网运行控制技术

2.1 飞轮储能系统控制原理

飞轮储能系统如图 3 所示,主要包括飞轮、电动/发电机、AC/DC 变换器、支撑轴承 4 部分。系统中飞轮与电动/发电机相连,通过电动/发电机实现机械能和电能间的相互转化。当转矩方向与飞轮转动方向一致时,飞轮将受到正向不平衡力矩的作用而加速,将能量转化为飞轮的动能储存起来;当转矩的方向与飞轮旋转的方向相反时,飞轮受到负方向不平衡力矩的作用而减速,将动能转化为电能释放出来^[21-22]。电动/发电机通过 AC/DC 变换器实现与外部电力系统的互动,根据直流母线电压的大小调整控制力矩,从而实现飞轮储能系统充放电,保持直流母线电压的稳定。

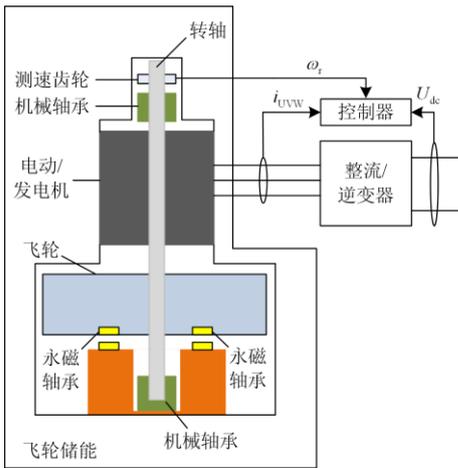


图 3 飞轮电池储能系统

Fig. 3 Flywheel battery energy storage system

飞轮储存能量的计算公式为

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

式中: J 为飞轮的转动惯量; ω 为飞轮旋转的角速度。当飞轮在最高转速 ω_{\max} 和最低转速 ω_{\min} 之间循环运转时,可以吸收和释放的最大能量如式(2)所示。

$$W = \frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad (2)$$

由式(2)可以看出,可通过检测 ω 的大小准确计

算出飞轮储能系统剩余容量。

2.2 直流母线电压稳定控制

为实现直流母线电压的稳定控制,多套飞轮储能系统接入情况下采用变系数下垂控制策略,其控制框图如图 4 所示。图中 $U_{dc_ref}(t)$ 为第 i 个储能单元当前时刻经下垂控制器校正后的输出电压的给定值, $I_{dc}(t)$ 为第 i 个储能单元当前时刻电流。 $k_i(t)$ 为当前时刻的下垂控制系数,由协调控制器根据当前母线电压以及各储能单元的 SOC 计算而来。

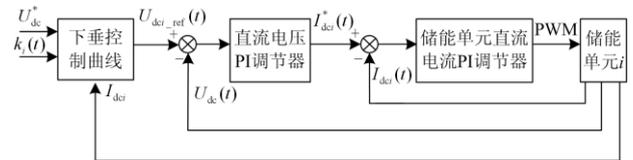


图 4 变系数下垂控制框图

Fig. 4 Block diagram of variable coefficient droop control

直流母线电压的高低是功率波动以及潮流流向的直接反映^[23],本文根据母线电压的大小,结合各储能单元的 SOC 对接入汇集系统中的各储能单元的下垂系数进行调整以稳定直流母线电压。为了便于下垂控制,将直流母线电压以及储能 SOC 进行分区,具体如图 5、图 6 所示。



图 5 直流母线电压分区

Fig. 5 DC bus voltage division

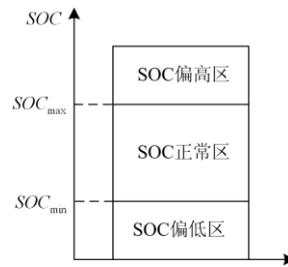


图 6 储能 SOC 分区

Fig. 6 Energy storage SOC division

当 $V_1 < U_{dc} \leq V_0$ 时, 系统处于正常工作区, 直流母线电压在正常范围内波动, 此时分布式新能源发电量与负荷消耗电量基本平衡。正常工作区域内储能单元 SOC 如果处于 SOC 正常区域, 不进行下垂系数的调整, 否则以初始值为基准按照式(3)进行调节。

$$k_i(t+1) = k_i(t) - \Delta k_i(t) \quad (3)$$

其中

$$\Delta k_i(t) = \frac{(SOC_i(t) \cdot S_i) |U_{dc}(t) - U_{dc}^*|}{\sum_{i=1}^n (SOC_i(t) \cdot S_i)} \quad (4)$$

式中: $k_i(t)$ 、 $k_i(t+1)$ 分别为当前时刻以及下一时刻第 i 个储能单元的下垂系数; $\Delta k_i(t)$ 为储能单元下垂系数变化值; $SOC_i(t)$ 、 S_i 分别为第 i 个储能单元当前时刻的 SOC 以及初始时刻容量。

当 $V_2 < U_{dc} \leq V_1$ 时, 系统处于母线电压偏低 1 区, 该区域内直流母线电压偏低, 此时分布式新能源发电量小于负荷消耗量。需根据直流母线电压降低幅度以及各储能单元自身剩余容量减小下垂系数, 提高直流母线电压。下垂系数按照式(3)进行调节, 其中 $\Delta k_i(t)$ 取值如式(5)所示。

$$\Delta k_i(t) = \delta_{L1} \frac{(SOC_i(t) \cdot S_i) |U_{dc}(t) - U_{dc}^*|}{\sum_{i=1}^n (SOC_i(t) \cdot S_i)} \quad (5)$$

式中, δ_{L1} 为母线电压偏低 1 区的下垂系数变化量加权值。

下垂系数约束条件为

$$\begin{cases} k_{i_max} \leq k_i(t+1) \leq k_{i_min}, i = 1, \dots, n \\ \delta_{L1} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, k_{i_max} 、 k_{i_min} 分别为下垂系数的最大值、最小值。

当 $V_3 < U_{dc} \leq V_2$ 时, 系统处于母线电压偏低 2 区, 该阶段直流母线电压偏低幅度较大, 调节方法与母线电压偏低 1 区相似, 继续减小储能单元下垂系数, 具体调节方法与母线电压偏低 1 区类似, 但是下垂系数变化量加权值为 δ_{L2} , 且满足 $\delta_{L2} > \delta_{L1}$ 。

当 $V_0 < U_{dc} \leq V_4$ 时, 系统处于母线电压偏高 1 区, 该阶段直流母线电压偏高, 此时分布式新能源发电量略高于负荷消耗量。需根据直流母线电压升高幅度以及各储能单元自身剩余容量调整下垂系数, 降低直流母线电压。下垂系数按照式(3)进行调节, 但是下垂系数变化值有所变化, 如式(7)所示。

$$\Delta k_i(t) = \delta_{H1} \frac{(SOC_i(t) \cdot S_i) |U_{dc}(t) - U_{dc}^*|}{\sum_{i=1}^n (SOC_i(t) \cdot S_i)} \quad (7)$$

式中, δ_{H1} 为母线电压偏高 1 区的下垂系数变化量加权值。

当 $V_4 < U_{dc} \leq V_5$ 时, 系统处于母线电压偏高 2 区, 该区域直流母线电压偏高幅度较大, 调节方法与母线电压偏高 1 区相似, 继续减小储能单元下垂系数, 下垂系数变化量加权值为 δ_{H2} , 且满足 $\delta_{H2} > \delta_{H1}$ 。

当 $U_{dc} < V_3$ 或 $U_{dc} > V_5$ 时, 系统则处于欠压故障区或过压故障区, 该区域内系统停止运行。此外为了防止系统在各工作区域临界点频繁切换可设置滞环。

2.3 并网运行控制策略

在完成直流母线电压稳定控制的基础上, 本文提出了不同工况下基于分布式光伏、飞轮储能联合发电系统的并网点电压主动支撑控制策略。为便于控制, 首先对并网点电压波动范围进行了划分, 如图 7 所示。当并网点电压 $U_A \in [U_{min1}, U_{max1}]$ 时, 根据飞轮当前转速、光伏出力调整交流侧功率大小, 优先使用光伏对各个飞轮单元进行充电, 使飞轮转速达到额定转速; 当 $U_A \in [U_{min2}, U_{max2}]$ 时, 以并网点

电压偏差最小和功率因数为优化目标, 以联合发电系统容量和飞轮 SOC 为约束条件, 调节交流侧有功无功输出, 从而实现对并网点电压的主动调控; 当 U_A 处于滞环区时则保持上一时刻的运行状态。其中 U_{min2} 、 U_{max2} 的选定依据低压配电标准要求的 $\pm 7\%$ 额定电压, 在 U_{min2} 、 U_{max2} 基础上增加 10% 的裕量作为 U_{min1} 、 U_{max1} 的选择标准。

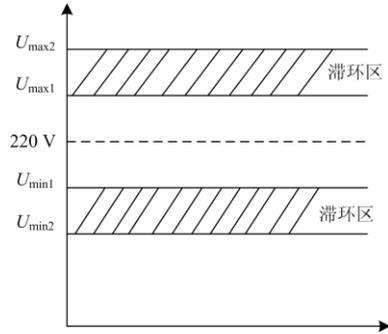


图 7 并网点电压波动范围划分

Fig. 7 Voltage fluctuation range division of parallel network

1) 联合发电系统接入及电压波动影响分析

联合发电系统接入拓扑如图 8 所示, 需同时采集 A 点电压、电流(U_A 、 I_A)和 B 点电压、电流(U_B 、 I_B), 电流以流向负荷方向为正。为简化运算, 忽略始端和末端导纳支路功率, 则始端电压 U_0 和末端电压 U_A 的关系如式(8)所示。

$$U_0 - U_A = \frac{P_A \cdot R + Q_A \cdot X}{U_A} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_A = P_B + P_C + P_D \\ Q_A = Q_B + Q_C + Q_D \end{cases} \quad (9)$$

式中, R 、 X 为线路阻抗参数。从式(8)、式(9)中不难看出, 通过改变联合发电系统输出的有功、无功输出能够实现对接网点电压的有效控制。

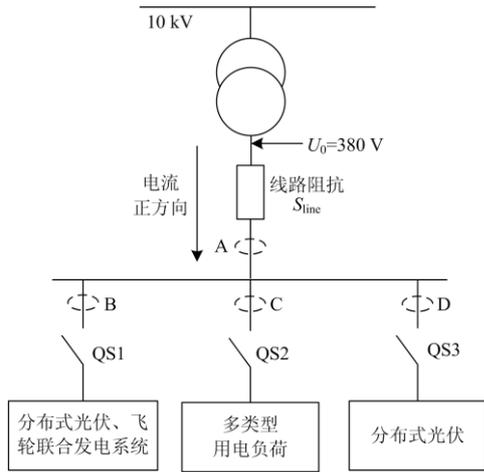


图8 联合发电系统接入拓扑

Fig. 8 Access topology of cogeneration system

2) 并网点电压未越限时控制策略

并网点电压未越限时, 分布式光伏/飞轮储能联合发电系统控制流程如图9所示。联合发电系统中分布式光伏优先运行于MPPT模式^[24-26], 当检测到飞轮储能阵列SOC超出设定阈值时按照式(10)和式(11)调整交流侧下一时刻输出功率输出值 $P_{ref}(t+1)$, 否则保持上一时刻的功率输出。

$$P_{ref}(t+1) = P_{ref}(t) + \sum_{i=1}^n \partial_i(t) P_{fly_i}(t) \quad (10)$$

$$\partial_i(t) = \begin{cases} 0, & SOC_i(t) \in [SOC_{min}, SOC_{max}] \\ 1, & SOC_i(t) > 1.1SOC_{max} \\ -1, & SOC_i(t) < 0.9SOC_{min} \\ \partial_i(t-1), & SOC_i(t) \in (SOC_{max}, 1.1SOC_{max}] \cup [0.9SOC_{min}, SOC_{min}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{ref}(t)$ 为当前时刻交流侧输出给定功率; $\partial_i(t)$ 、 $\partial_i(t-1)$ 、 $P_{fly_i}(t)$ 分别为第 i 号飞轮储能单机当前时刻、上一时刻可输出功率标志和当前时刻输出功率; $SOC_i(t)$ 、 SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为当前时刻第 i 号飞轮储能单机 SOC、正常运行时飞轮 SOC 上限值和下限值。

3) 并网点电压越限时控制策略

当并网点电压超出设定阈值时以功率因数和并网变流器容量为约束条件进行无功功率调整, 单独

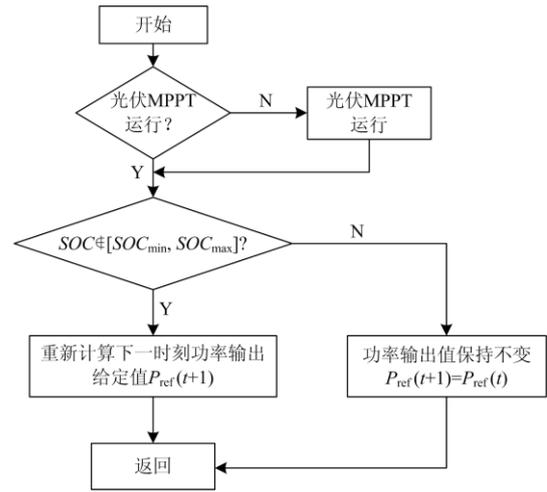


图9 电压未越限时分布式光伏/飞轮储能联合发电系统控制流程

Fig. 9 Control flow of distributed photovoltaic/flywheel energy storage combined generation system when voltage is not over limit

无功功率调整无法满足需求后则以飞轮储能剩余能量为约束条件进一步进行有功功率输出调整, 并网点电压越限时分布式光伏/飞轮储能联合发电系统控制流程如图10所示, 具体工作如下所述。

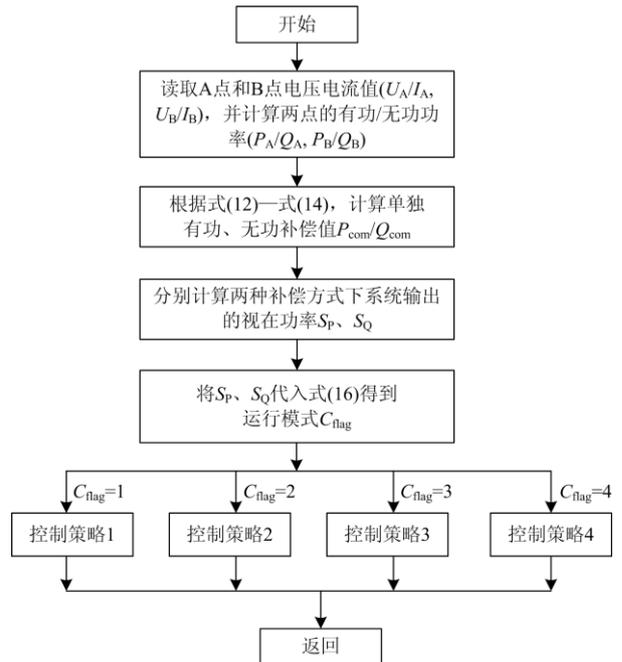


图10 电压越限时分布式光伏/飞轮储能联合发电系统控制流程

Fig. 10 Control flow of distributed photovoltaic/flywheel

energy storage combined generation system
when voltage exceeds limit

(1) 实时数据读取及功率计算。读取当前时刻 A 点、B 点处的点电压电流值 $U_A(t)$ 、 $I_A(t)$ 、 $U_B(t)$ 、 $I_B(t)$, 并计算当前有功/无功功率 $P_A(t)$ 、 $Q_A(t)$ 、 $P_B(t)$ 、 $Q_B(t)$ 。

(2) 单独有功/无功功率补偿值计算。根据图 7 和式(8), 当 A 点电压超出设定阈值时可计算单独进行有功/无功补偿时功率 $P_{\text{com}}(t)$ 、 $Q_{\text{com}}(t)$, 计算方法如式(12)一式(14)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{com}}(t) = P_{A_s}(t) - P_A(t) + P_B(t) \\ Q_{\text{com}}(t) = Q_{A_s}(t) - Q_A(t) + Q_B(t) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{A_s}(t) = \frac{\Delta U(t) \cdot U_A(t) - Q_A(t) \cdot X}{R} \\ Q_{A_s}(t) = \frac{\Delta U(t) \cdot U_A(t) - P_A(t) \cdot R}{X} \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta U(t) = \begin{cases} U_{\max 1} - U_A(t), & U_A(t) \geq U_{\text{norm}} \\ U_A(t) - U_{\min 1}, & U_A(t) < U_{\text{norm}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{A_s}(t)$ 、 $Q_{A_s}(t)$ 分别为当前时刻进行单一功率调节时 A 点处有功和无功功率值; U_{norm} 为额定电压值。

(3) 计算控制策略标志。根据式(15)计算两种补偿方式下一时刻联合发电系统的视在功率输出 $S_{B_P}(t+1)$ 、 $S_{B_Q}(t+1)$ 。以联合发电系统输出容量为约束条件可将功率补偿控制方式分为 4 种, 如表 1 所示, 其中控制策略标志 $C_{\text{flag}}(t+1)$ 可根据式(16)计算得到。

$$\begin{cases} S_{B_P}(t+1) = \sqrt{(P_B(t) + P_{\text{com}}(t))^2 + Q_B(t)^2} \\ S_{B_Q}(t+1) = \sqrt{(Q_B(t) + Q_{\text{com}}(t))^2 + P_B(t)^2} \end{cases} \quad (15)$$

$$C_{\text{flag}}(t+1) = \begin{cases} 1, & S_{B_P}(t+1) \leq S_{\max} \text{ 且 } S_{B_Q}(t+1) \leq S_{\max} \\ 2, & S_{B_P}(t+1) > S_{\max} \text{ 且 } S_{B_Q}(t+1) > S_{\max} \\ 3, & S_{B_P}(t+1) < S_{\max} \text{ 且 } S_{B_Q}(t+1) > S_{\max} \\ 4, & S_{B_P}(t+1) > S_{\max} \text{ 且 } S_{B_Q}(t+1) < S_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

表 1 控制策略逻辑表

Table 1 Control strategy logic table

$C_{\text{flag}}(t+1)$ 值	控制策略编号	控制含义
1	1	单独进行有功/无功补偿均可
2	2	单独进行有功/无功补偿均不可
3	3	单独有功补偿可以, 单独无功补偿不可
4	4	单独无功补偿可以, 单独有功补偿不可

(4) 根据各控制策略计算联合发电系统相应有

功/无功输出功率值。

(a) 控制策略 1。该策略以优化 A 点功率因数为目标, 若进行无功补偿的方向与当前无功方向不同, 则根据无功补偿功率大小和 A 点当前无功大小确定联合发电系统无功功率补偿值, 否则保持当前无功功率输出。联合发电系统无功功率输出 $Q_{B_{\text{ref}}}(t)$ 的计算如式(17)所示, 有功功率输出 $P_{B_{\text{ref}}}(t)$ 的计算如式(18)所示。

$$Q_{B_{\text{ref}}}(t) = \begin{cases} Q_{\text{com}}(t), & |Q_{\text{com}}(t)| \leq |Q_A(t)| \text{ 且 } Q_{\text{com}}(t) \cdot Q_A(t) < 0 \\ -Q_A(t), & |Q_{\text{com}}(t)| > |Q_A(t)| \text{ 且 } Q_{\text{com}}(t) \cdot Q_A(t) < 0 \\ Q_B(t), & Q_{\text{com}}(t) \cdot Q_A(t) \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_{B_{\text{ref}}}(t) = \frac{\Delta U(t) \cdot U_A(t) - Q_{A_{\text{ref}}}(t) \cdot X}{R} - P_A(t) + P_B(t) \\ Q_{A_{\text{ref}}}(t) = Q_A(t) + Q_{B_{\text{ref}}}(t) - Q_B(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中, $Q_{A_{\text{ref}}}(t)$ 为补偿后的 A 点无功功率。

(b) 控制策略 2。该策略以降低并网点偏差为优化目标, 根据联合发电系统有功/无功补偿的上限 $P_{\text{com}_{\max}}(t)$ 、 $Q_{\text{com}_{\max}}(t)$ 确定有功/无功输出的给定值。计算方式如式(19)一式(22)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{com}_{\max}}(t) = \begin{cases} \sqrt{S_{\max}^2 - Q_B^2(t)}, & P_{\text{com}}(t) \geq 0 \\ -\sqrt{S_{\max}^2 - Q_B^2(t)}, & P_{\text{com}}(t) < 0 \end{cases} \\ Q_{\text{com}_{\max}}(t) = \begin{cases} \sqrt{S_{\max}^2 - P_B^2(t)}, & Q_{\text{com}}(t) \geq 0 \\ -\sqrt{S_{\max}^2 - P_B^2(t)}, & Q_{\text{com}}(t) < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \Delta U_P(t) = \frac{(P_A(t) + P_{\text{com}_{\max}}(t) - P_B(t)) \cdot R + Q_A(t) \cdot X}{U_A(t)} \\ \Delta U_Q(t) = \frac{P_A(t) \cdot R + (Q_A(t) + Q_{\text{com}_{\max}}(t) - Q_B(t)) \cdot X}{U_A(t)} \end{cases} \quad (20)$$

$$P_{B_{\text{ref}}}(t) = \begin{cases} P_{\text{com}_{\max}}(t), & |\Delta U_P(t)| \leq |\Delta U_Q(t)| \\ P_A(t), & |\Delta U_P(t)| > |\Delta U_Q(t)| \end{cases} \quad (21)$$

$$Q_{B_{\text{ref}}}(t) = \begin{cases} Q_A(t), & |\Delta U_P(t)| \leq |\Delta U_Q(t)| \\ Q_{\text{com}_{\max}}(t), & |\Delta U_P(t)| > |\Delta U_Q(t)| \end{cases} \quad (22)$$

(c) 控制策略 3。该控制策略下只进行有功补偿, 无功输出维持原状态不变, 联合发电系统有功/无功给定值如式(23)所示。

$$\begin{cases} P_{B_ref}(t) = P_{com}(t) \\ Q_{B_ref}(t) = Q_B(t) \end{cases} \quad (23)$$

(d) 控制策略 4。该控制策略下只进行无功补偿,有功输出维持原状态不变,联合发电系统有功/无功给定值如式(24)所示。

$$\begin{cases} P_{B_ref}(t) = P_A(t) \\ Q_{B_ref}(t) = Q_{com}(t) \end{cases} \quad (24)$$

3 实验测试

1) 实验测试拓扑

为验证第 2 章中所提控制策略的可行性,搭建了如图 11 所示的实验测试平台。实验平台内包含线路阻抗模拟器、分布式光伏、飞轮储能、RLC 负载等设备,具体参数如表 2 所示,控制参数如表 3 所示。

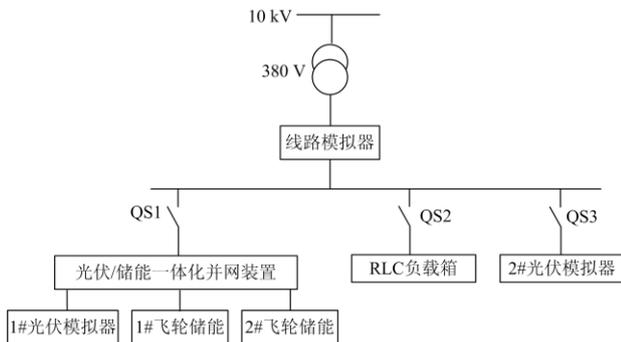


图 11 实验环境拓扑

Fig. 11 Topology of experimental environment

表 2 实验平台主要设备

Table 2 Main equipment of experimental platform

序号	名称	参数	个数
1	1#光伏模拟器	20 kW	1
2	飞轮储能	50 kW	2
3	RLC 负载	100 kvar	1
4	2#光伏模拟器	100 kW	1
5	光伏逆变器	100 kW	1
6	光伏/飞轮储能一体化并网装置	100 kW	1
7	线路阻抗模拟器	2 km	1

表 3 分布式光伏/储能联合发电系统控制参数

Table 3 Control parameters of distributed photovoltaic/energy storage combined generation system

序号	名称	参数
1	U_{max1}	225 V
2	U_{max2}	230 V
3	U_{min1}	215 V

4	U_{min2}	210 V
5	S_{max}	100 kvar
6	X	0.158 Ω
7	R	1.08 Ω

2) 实验测试及结果

在如图 11 所示的实验环境下进行并网点电压主动支撑控制策略测试,测试结果如下。

(1) 联合发电系统并网运行初始时刻输出有功功率 $P = -50$ kW,无功功率 $Q = 50$ kvar,2#光伏模拟器输出功率 100 kW,RLC 负载有功/无功输出分别为 50 kW、-45 kvar。 t 时刻 RLC 负载有功/无功输出均调整为 0,并网电压超出设定阈值,经计算联合发电系统采用控制策略 1,同时进行有功、无功调节,输出波形如图 12 所示,联合发电系统有功增加至-100 kW,无功降为 0。

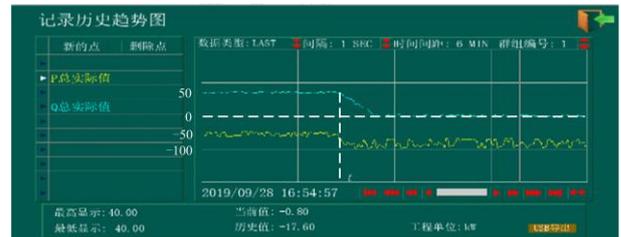


图 12 联合发电系统有功无功同时调整

Fig. 12 Simultaneous adjustment of active and reactive power in cogeneration system

(2) 联合发电系统初始时刻有功为-30 kW,无功为-20 kvar,2#光伏模拟器输出功率为 100 kW,RLC 负载有功/无功输出分别为 70 kW、20 kvar。 t 时刻调整 RLC 负载有功为 0,电压超出设定阈值,经计算联合发电系统采用控制策略 3,进行有功功率调节,输出波形如图 13 所示,有功功率由-30 kW调整至-100 kW,无功功率保持不变。



图 13 联合发电系统无功功率保持不变,有功功率增加

Fig. 13 Reactive power of cogeneration system remains unchanged and the active power increases

(3) 联合发电系统初始时刻有功为-70 kW,无功为 30 kvar,2#光伏模拟器输出功率为 70 kW,RLC

负载输出无功为 -30 kvar 。 t 时刻调整 RLC 负载无功为 70 kvar , 电压超出设定阈值, 经计算联合发电系统采用控制策略 4, 进行无功功率调节, 输出波形如图 14 所示, 有功功率保持不变, 无功功率调整至 -67 kvar 。

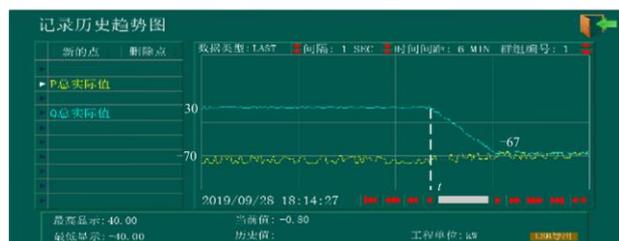


图 14 联合发电系统有功功率不变, 无功功率调整

Fig. 14 Active power of cogeneration system remains unchanged and the reactive power adjustment

4 总结

本文首先对分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的交直流两种拓扑形式的优缺点进行了分析, 最终采用直流侧并联的拓扑形式。在该拓扑结构下, 提出了基于分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的并网点电压主动支撑控制策略。当并网点电压未超出设定阈值时, 一方面分布式光伏运行于 MPPT 状态, 另一方面通过调整联合发电系统功率输出使飞轮储能 SOC 处于可用范围内; 当并网点电压超出设定阈值时, 给出了以减小并网点偏差和改善功率因数为优化目标、以联合发电系统容量为约束条件的控制流程和有功/无功功率计算方法。最后搭建了含 50 kW 光伏、 100 kW 飞轮储能系统在内的试验平台。实验测试结果表明, 所提控制策略能够实现并对并网点电压的主动支撑, 改善区域电网的供电质量。

参考文献

- [1] 隋兴嘉, 肖勇, 郑楷洪, 等. 光储与 DSTATCOM 协同运行及定容[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6): 150-157.
SUI Xingjia, XIAO Yong, ZHENG Kaihong, et al. Coordinative operation and capacity allocation of photovoltaic-storage and DSTATCOM systems[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 150-157.
- [2] 任洛卿, 白泽洋, 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): 105-110.
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 Systems, 2014, 38(7): 105-110.
- [3] 李江, 张永利, 刘强, 等. 分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 90-97.
LI Jiang, ZHANG Yongli, LIU Qiang, et al. Research on grid-connected control strategy of distributed PV-storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 90-97.
- [4] 杨涛, 周俊, 王文轩, 等. 储能光储微电网中的应用研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(6): 72-77.
YANG Tao, ZHOU Jun, WANG Wenxuan, et al. Study of the application of energy storage technology in photovoltaic/battery micro-grid[J]. Power Electronics, 2018, 52(6): 72-77.
- [5] 刘迎澍, 王翠敏. 光储微电网并网模式协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 127-132.
LIU Yingshu, WANG Cuimin. Coordinated control strategy for micro-grid with photovoltaic and energy storage units in grid connected operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 127-132.
- [6] 薛花, 李海霞, 王育飞. 基于非线性微分平滑方法的分布式光储直流供电系统电压稳定控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 46-53.
XUE Hua, LI Haixia, WANG Yufei. DC bus stabilization control of distributed photovoltaic-energy storage DC generation system based on nonlinear differential flatness method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 46-53.
- [7] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.
FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.
- [8] EFSTRATIOU C, DANIEL J R. A comparison of grid-connected battery energy storage system designs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6913-6923.
- [9] TANG Chenghui, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Stochastic battery energy storage scheduling considering cell degradation and distributed energy resources[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(7): 1-20.
- [10] 熊连松, 卓放, 刘小康, 等. 不对称电网同步相位的快速开环捕获方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5682-5691.
XIONG Liansong, ZHUO Fang, LIU Xiaokang, et al. Research on fast phase synchronization scheme for three-phase unbalanced power system[J]. Proceedings of

- the CSEE, 2015, 35(22): 5682-5691.
- [11] LEE K J, LEE J P, SHIN D S, et al. A novel grid synchronization PLL method based on adaptive low-pass notch filter for grid-connected PCS[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 292-300.
- [12] LUO A, CHEN Y D, SHUAI Z K, et al. An improved reactive current detection and power control method for single phase photovoltaic grid-connected DG system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 823-831.
- [13] 侯文捷, 武鸿鹏, 高峰亭, 等. 基于区块链智能合约的电力供应链利益分配研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2020, 33(1): 144-148.
- HOU Wenjie, WU Hongpeng, GAO Fengting, et al. Research on profit allocation of power supply chain based on block chain smart contract[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2020, 33(1): 144-148.
- [14] 石定中, 杨金东, 李正国, 等. 基于分布式电源集群的配电网电压控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 121-126.
- SHI Dingzhong, YANG Jindong, LI Zhengguo, et al. Voltage control strategy of distribution network based on distributed generation cluster[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 121-126.
- [15] LU X N, GUERRERO J M, SUN K, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [16] HE G, CHEN Q, KANG C, et al. Optimal operating strategy and revenue estimates for the arbitrage of a vanadium redox flow battery considering dynamic efficiencies and capacity loss[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(5): 1278-1285.
- [17] 王淑超, 段胜朋, 王健, 等. 光伏电站面向快速频率响应的优化控制技术研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 59-70.
- WANG Shuchao, DUAN Shengpeng, WANG Jian, et al. Research and practice of fast frequency response oriented control optimization technology of PV power stations[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 59-70.
- [18] ANNAMRAJU A, NANDIRAJU S. Robust frequency control in a renewable penetrated power system: an adaptive fractional order-fuzzy approach[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 181-195. DOI: 10.1186/s41601-019-0130-8.
- [19] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [20] ELMOURSIS M S, BAKJENSEN B, ABDELRAHMAN M H. Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2): 429-441.
- [21] 李明烜, 王跃, 徐宁一, 等. 基于带通阻尼功率反馈的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2176-2185.
- LI Mingxuan, WANG Yue, XU Ningyi, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on bandpass damping power feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2176-2185.
- [22] XIONG Liansong, ZHUO Fang, WANG Fang, et al. Static synchronous generator model: a new perspective to investigate dynamic characteristics and stability issues of grid-tied PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6264-6280.
- [23] 熊连松, 修连成, 王慧敏, 等. 储能系统抑制电网功率振荡的机理研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4373-4380.
- XIONG Liansong, XIU Liancheng, WANG Huimin, et al. Mechanism of energy storage system to suppress grid power oscillations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4373-4380.
- [24] 朱梓嘉, 肖辉, 赵帅旗, 等. 基于并行组合进化算法的光伏阵列最大功率点追踪[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 1-10.
- ZHU Zijia, XIAO Hui, ZHAO Shuaiqi, et al. Maximum power point tracking of photovoltaic array based on parallel combination evolutionary algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 1-10.
- [25] SALMAN S, AI Xin, WU Zhouyang. Design of a P-&-O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [26] 王志豪, 李自成, 王后能, 等. 基于RBF神经网络的光伏系统 MPPT 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 85-91.
- WANG Zhihao, LI Zicheng, WANG Houneng, et al. MPPT study of solar PV power system based on RBF neural network algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 85-91.

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-12-31
作者简介:

余豪杰(1988—)，男，通信作者，硕士研究生，工程师，研究方向为储能系统关键装置开发及应用。E-mail: yuhaojie@epri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)