

基于光伏 - 蓄电池 - 超级电容的微电网协调控制策略

张 谦 蒋永梅 丁 敏 金武杰 金晨星

(国网浙江省电力有限公司舟山供电公司 浙江 舟山 316021)

摘 要: 针对光伏系统的不足, 利用蓄电池 - 超级电容对光伏发电系统出力的互补特性, 构成蓄电池 - 超级电容和光伏发电的微电网系统, 并提出采用基于直流母线电压平衡的控制策略实现蓄电池 - 超级电容的快速响应。基于 Matlab/Simulink 搭建微电网模型, 仿真验证了控制策略的优越性和正确性。

关键词: 光伏电池; 混合储能系统; 微电网建模; 协调控制

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2019)01 - 0019 - 04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.01.004

A Coordinated Control Strategy of Microgrid Based on PV , BES and SC

Zhang Qian , Jiang Yongmei , Ding Ming , Jin Wujie , Jin Chenxing

(Zhoushan Power Supply Company , State Grid Zhejiang Electric Power Company , Zhoushan 316021 , Zhejiang , China)

Abstract: For the shorts of the output of photovoltaic power generation system , the complementary characteristics of battery and supercapacitor energy storage system to photovoltaic power generation system is utilized to composed the microgrid system with photovoltaic power generation , battery and supercapacitor . A control strategy based on DC bus voltage balance is proposed to achieve the fast response of battery and supercapacitor . Finally , the simulation model of microgrid is established with Matlab/Simulink simulation software , and the simulation results verify the superiority and validity of the proposed control strategy .

Key words: photovoltaic cell; hybrid energy storage system; microgrid modeling; coordinated control

0 引 言

新能源系统的功率受气候和天气影响存在较大波动性, 影响电能质量和电力系统的可靠性。为保持稳定的电力输出, 通常需增加储能装置。国内基于光、储能供电微电网系统的研究也处于发展阶段, 基于光伏和蓄电池 - 超级电容的微电网系统运行特性及其控制策略研究具有一定的理论参考价值和实用价值^[1-5]。

为确保微电网系统安全可靠运行, 混合储能的协调控制策略是关键技术。为解决此问题, 文献[6-7]采用蓄电池与燃料电池发电系统作为车辆微电网的辅助电源, 蓄电池主要吸收功率波动。文献[8]分析了含光伏和蓄电池的微电网储能技术, 但

其中蓄电池结构过于简单, 充放电过程不可控制。文献[9-11]采用了一种新型拓扑结构, 通过变换器集成燃料电池与光伏使得光伏发电单元工作在最优状态。

首先确定了光伏 - 蓄电池 - 超级电容混合储能系统类型, 并对混合储能系统的连接方式进行了选择, 进而提出了混合储能的控制策略, 这种策略的控制目的是实现直流母线电压的可控, 并且通过仿真软件仿真验证了控制策略的优越性和正确性。

1 直流微电网建模

1.1 光伏电池模型

光伏电池等效电路如图 1 所示。

光伏阵列在参考日照强度与参考电池温度下的

输出电流 I_{pv} 和输出电压 U_{pv} 关系式及相应方程为

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{U_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{nkT}} - 1 \right) - \frac{U_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (3)$$

$$I'_{SC} = I_{SC} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (4)$$

$$V'_{OC} = V_{OC} (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \quad (5)$$

$$I'_{MPP} = I_{MPP} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (6)$$

$$V'_{MPP} = V_{MPP} (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \quad (7)$$

$$R_s = I_{MPP} \left(\frac{V_{OC} - I_{SC} \ln \frac{I_{SC} - I_{MPP}}{I_{sat}} - V_{MPP}}{\ln \frac{I_{SC}}{I_{sat}}} \right) \quad (8)$$

式中: I_{ph} 为光生电流; I_s 为二极管饱和电流; R_s 、 R_{sh} 分别为串联电阻和分流电阻; k 为波尔兹曼常数; T 为蓄电池的温度。

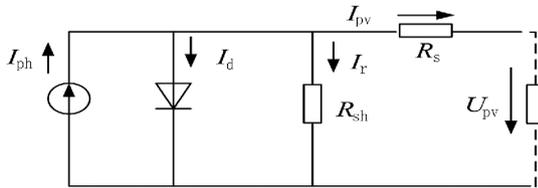


图1 光伏电池等效电路

1.2 蓄电池模型

通过分析比较不同类型的蓄电池性能,结果显示锂离子蓄电池性能更好,所以采用该类型蓄电池。其充放电数学模型如下:

$$E_d = E_0 - \frac{K \cdot Q \cdot i^* t}{Q - it} - \frac{K \cdot Q \cdot it}{Q - it} + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (9)$$

$$E_c = E_0 - \frac{K \cdot Q \cdot i^* t}{0.1Q + it} - \frac{K \cdot Q \cdot it}{Q - it} + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (10)$$

$$SOC = 1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \quad (11)$$

式中: E_c 、 E_d 为充放电电能; E_0 为电压常数; i^* 为低频动态电流; K 为极化常数; it 为可提取的电能; i 为充放电电流; t 为充放电时间; Q 为蓄电池最大容量; A 为指数电压; B 为指数容量; SOC 为荷电状态。

1.3 超级电容储能系统数学模型

超级电容器等效模型一般为 RC 等效电路,其

具体结构如图2所示。

相应数学表达式如下:

$$P = U_0 I = (U - IR) I \quad (12)$$

$$C = \frac{Idt}{dV} \quad (13)$$

$$E = \frac{1}{2} C U_{max}^2 - \frac{1}{2} C U_{min}^2 \quad (14)$$

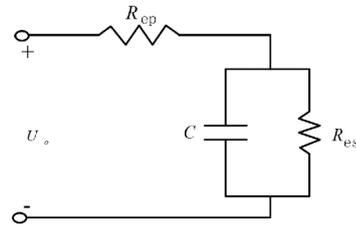


图2 超级电容等效电路

$$\eta = \frac{E_{dch}}{E_{cha}} = \frac{\int_0^t I_d \times u(t) dt}{\int_0^t I_c \times u(t) dt} \quad (15)$$

$$\eta_c = \frac{\frac{1}{2} C (U_{cmax}^2 - U_{cmin}^2)}{\int_0^t I_c \times u(t) dt} \quad (16)$$

$$\eta_d = \frac{\int_0^t I_d \times u(t) dt}{\frac{1}{2} C (U_{dmax}^2 - U_{dmin}^2)} \quad (17)$$

超级电容组的总电阻和总电容通过式(18)、式(19)计算:

$$R_{UC-total} = n_s \frac{R_{ES}}{n_p} \quad (18)$$

$$C_{UC-total} = n_p \frac{C}{n_s} \quad (19)$$

式中: U_{max} 、 U_{min} 为超级电容允许的最高、最低工作电压; U_0 为初始电压; I_c 、 I_d 为充、放电电流; E_c 、 E_d 分别为充、放电能量; E 为超级电容能量输出; η 为超级电容的效率; η_c 、 η_d 分别为充、放电效率; U_{cmax} 、 U_{cmin} 分别为充电截止电压和起路电压; U_{dmax} 、 U_{dmin} 分别为放电起始电压和截止电压。

2 混合储能并联方式的选择

为了弥补超级电容(supercapacitor, SC)和蓄电池独立应用时的不足,结合两者的特点分析,不难看出两者是有互补作用的:蓄电池适合长时间持续放电,但对突变情况反映缓慢;而超级电容则可以快速反应各种突变,但不具备长时间持续放电的特点。

以 SC 和 蓄 电 池 储 能 系 统 (battery energy storage , BES) 组 成 的 混 合 储 能 为 例 , 通 过 分 析 各 种 结 构 的 优 缺 点 , 确 定 了 最 终 方 案 。 SC 和 BES 通 过 共 用 逆 变 器 与 电 网 连 接 , 控 制 直 流 母 线 电 压 实 现 功 率 调 节 。 通 过 功 率 变 换 器 并 联 混 合 储 能 , 如 图 3 所 示 , 将 大 大 提 高 系 统 的 灵 活 性 。

综 上 所 述 , 不 难 看 出 带 混 合 储 能 的 独 立 光 伏 发 电 系 统 只 需 将 蓄 电 池 与 超 级 电 容 通 过 各 自 的 变 换 器 并 联 即 可 。 图 3 中 并 未 涉 及 交 流 负 载 , 但 可 以 通 过 DC/AC 与 交 流 负 载 相 连 。

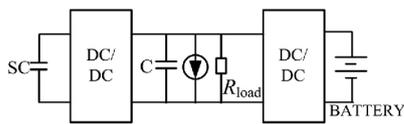


图3 混合储能并联结构

3 混合储能系统控制策略

混 合 储 能 的 控 制 方 法 依 然 采 用 以 稳 定 直 流 母 线 电 压 为 目 的 的 控 制 策 略 , 如 图 4 所 示 。 结 合 两 种 储 能 方 式 的 特 点 , 通 过 低 通 滤 波 器 将 功 率 差 值 分 为 低 频 、 高 频 两 部 分 。 基 于 SC 充 、 放 电 速 度 快 的 优 点 , 由 SC 负 责 吸 收 和 释 放 因 多 种 原 因 产 生 的 高 频 功 率 。 BES 因 能 量 密 度 大 , 作 为 长 时 间 的 储 能 装 置 , 负 责 吸 收 和 释 放 低 频 功 率 。

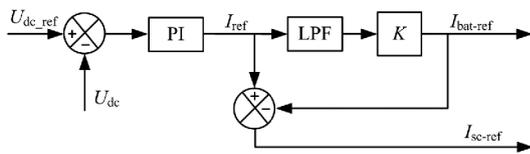


图4 外环控制框图

图 5 为 混 合 储 能 系 统 的 控 制 框 图 。 当 $U_{dc-ref} > U_{dc}$ 时 , 此 时 PI 环 的 输 出 为 正 值 , $I_{bat-ref}$ 、 I_{sc-ref} 均 为 正 值 , 混 合 储 能 处 于 放 电 状 态 。 反 之 , 混 合 储 能 处 于 充 电 状 态 。 为 保 证 BES 吸 收 能 量 中 的 低 频 部 分 和 SC 吸 收 能 量 中 的 高 频 部 分 , 引 入 低 通 滤 波 器 和 比 例 系 数 K 。

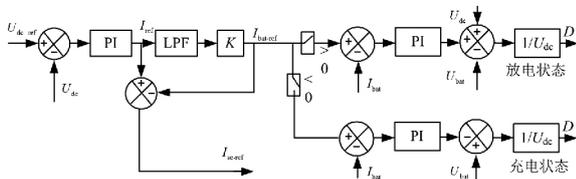


图5 混合储能系统控制框图

4 仿真验证

为 验 证 基 于 PV、BES、SC 的 微 电 网 控 制 策 略 的 可 行 性 , 基 于 Matlab/Simulink 搭 建 微 电 网 模 型 , 如 图 6 所 示 ; 各 部 分 参 数 如 表 1 至 表 3 所 示 。

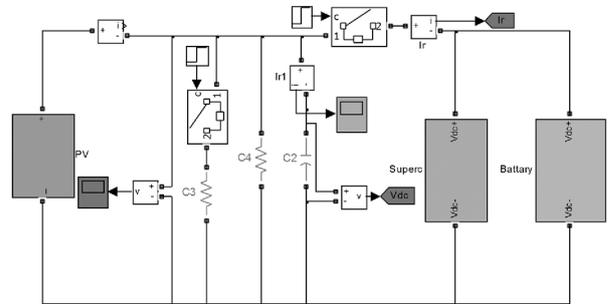


图6 带混合储能的光伏发电系统仿真模型

表1 光伏电池参数

| 名称 | 数值 | 名称 | 数值 |
|---------|-----|--------------|-------|
| 开路电压/V | 215 | 短路电流/A | 31.65 |
| MPP电压/V | 175 | MPP电流/A | 29.55 |
| 额定功率/kW | 5 | 内阻/ Ω | 0.20 |

表2 蓄电池参数

| 名称 | 数值 | 名称 | 数值 |
|--------------|------|---------|-------|
| 额定电压/V | 100 | 额定容量/Ah | 20 |
| 内阻/ Ω | 0.05 | 最大容量/Ah | 20.83 |
| 额定功率/kW | 5 | | |

表3 超级电容参数

| 名称 | 数值 | 名称 | 数值 |
|-------------------------------|------|------------------------------|------|
| 能量密度 / ($Wh \cdot kg^{-1}$) | 3.9 | 功率密度 / ($W \cdot kg^{-1}$) | 3300 |
| 循环效率 | 0.98 | | |

在 该 模 型 中 , 直 流 负 载 $C_3 = 200 \Omega$, $C_4 = 200 \Omega$, 设 定 Ideal Switch 的 触 发 信 号 $t = 0.3 s$ 时 , 触 发 信 号 由 0 变 为 1 , 等 同 于 将 直 流 负 载 由 200Ω 增 至 400Ω 。 $t = 0.6 s$ 时 , 触 发 信 号 由 1 变 为 0 , 等 同 于 将 直 流 负 载 由 400Ω 减 至 200Ω 。 仿 真 波 形 如 图 7 至 图 9 所 示 。

由 图 7 可 以 看 出 , 无 论 是 负 载 由 200Ω 增 加 到 400Ω 的 过 程 还 是 负 载 由 400Ω 减 少 到 200Ω 的 过 程 , 直 流 母 线 电 压 为 $150 V$, 波 动 幅 度 小 于 $0.5 V$ 。 因 此 所 提 出 的 基 于 直 流 母 线 电 压 平 衡 的 储 能 控 制 策 略 。

略能够达到预期效果。

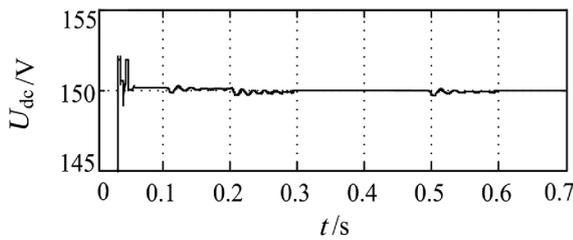


图7 直流母线电压波形

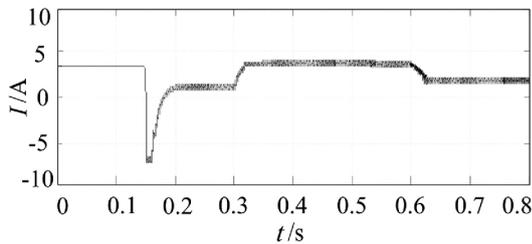


图8 蓄电池充、放电波形

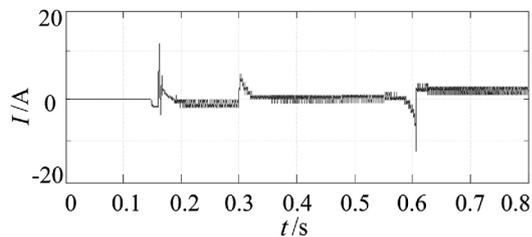


图9 超级电容器充、放电波形

由图8和图9可以看出,在 $t=0.3\text{ s}$ 和 $t=0.6\text{ s}$ 负载发生增减时,在突变的瞬间,SC的充、放电电流骤增或骤减,而BES的充、放电电流缓慢上升或下降,约 0.02 s 后达到稳定状态。

通过分析混合储能系统的仿真波形可知,当负载发生突变时,由SC进行快速的充、放电,缓冲瞬间的功率差变化;待稳定后,由BES吸收和释放能量以弥补不平衡功率。仿真结果表明BES的充、放电状态一直很平稳,SC在突变情况下弥补BES不能快速放电和放电电流小的缺陷。

5 结 语

首先确定了所研究系统中储能方式为混合储能方式,然后确定了混合储能系统的连接方式。在设计混合储能系统的控制策略时,采用基于直流母线

电压平衡的控制策略,同时加入低通滤波器,能够有效地区分能量差中的高频部分和低频部分,这样不仅充分地发挥了各储能装置的作用,也提高了系统的响应速度。仿真验证了该控制策略可以通过协调控制SC和BES,确保在负载和光照强度大幅波动的情况下直流母线电压处于允许范围内。

参考文献

- [1] Magdi S. Mahmoud, Mohamed Saif Ur Rahman, Fouad M. A. L. - Sunni F. M. Review of Microgrid Architectures - A System of Systems Perspective [C]. IET Renewable Power Generation 2015 9(8): 1064 - 1078.
- [2] 马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化 2015 39(8): 168 - 175.
- [3] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报 2012 27(1): 98 - 106.
- [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.
- [5] Saleh Ziaeinejad, Younes Sangsefidi, Ramon Zamora, et al. Design of A Fuel Cell - based Battery Extender Auxiliary Power Unit for a Vehicular Microgrid [C]. 40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON) 2014: 3948 - 3954.
- [6] 姜志玲, 陈维荣, 刘小强, 等. 燃料电池发电系统的能量管理控制[J]. 电源技术 2010 34(9): 911 - 914.
- [7] 金科, 阮新波, 杨孟雄, 等. 复合式燃料电池供电系统[J]. 电工技术学报 2008 23(3): 92 - 98.
- [8] 史君海, 朱新坚, 隋生, 等. 燃料电池 - 光伏混合发电系统建模与仿真[J]. 电源技术 2007 31(9): 728 - 731.
- [9] Prajof P, Vivek Agarwal. Novel Solar PV - fuel Cell Fed Dual - input - dual - output DC - DC Converter for DC Microgrid Applications [C]. Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) 2015: 1 - 6.
- [10] 王冰清, 曾国宏, 童亦斌, 等. 光伏组件精确工程模型及MPP电压范围研究[J]. 电网技术 2013 37(11): 3086 - 3090.
- [11] 李春华, 朱新坚. 基于混合储能的光伏微网动态建模与仿真[J]. 电网技术 2013 37(1): 39 - 46.

作者简介:

张 谦(1989), 硕士, 从事装表接电工作, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2018 - 08 - 06)