

基于 DAB 的光储型混合系统功率 调节与控制

伏祥运¹, 汤国晟², 崔红芬³, 杨婷², 王琛³, 岳付昌³

(1. 国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222000; 2. 南京工程学院, 江苏 南京 211167;
3. 中国电力科学研究院有限公司南京分院, 江苏 南京 211003)

摘要: 储能是平抑光伏发电功率波动的有效方式。针对光储型交直流混合系统典型应用场景, 为解决光伏单元与储能单元的接入和功率调节问题, 提出一种基于隔离型双向全桥变换器的功率调节拓扑, 并基于功率直接反馈理论设计光储能量协调控制策略。通过在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型, 进行仿真实验分析, 结果表明所提技术方案的正确性与有效性。

关键词: 光储混合系统; 双向全桥变换器; 功率调节

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.018 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2020)06-0138-06

Study on power regulation and control based on DAB for a hybrid system with photovoltaic and storage

FU Xiangyun¹, TANG Guosheng², CUI Hongfen³, YANG Ting², WANG Chen³, YUE Fuchang³

(1. Lianyungang Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, China;
2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 3. Nanjing Branch, China Electric Power
Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211003, China)

Abstract: Energy storage is an effective way to smooth out fluctuations in the photovoltaic power generation. Aiming at the typical application scenarios of the optical storage type AC/DC hybrid system, a power adjustment topology based on the isolated dual active bridge (DAB) is proposed in order to solve the problem of the access and power adjustment of the photovoltaic unit and the energy storage unit. Based on the theory of direct power feedback, a coordinated control strategy for optical energy storage is then designed. A simulation model is built in MATLAB/Simulink and further analyzed. The results indicate the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: photovoltaic and energy storage hybrid system; dual active bridge; power regulation

收稿日期: 2018-07-15; 修回日期: 2018-10-19

基金项目: 江苏省重点研发计划(BE2017169); 江苏省第五期“333工程”科研项目(BPA2020319); 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2017134)

通信作者: 杨婷(1986-), 女, 工程师, 主要从事电能质量技术、电力储能应用技术等研究; E-mail: annayang_1986@163.com

近年来,在国家政策鼓励与大力支持下,各地光伏发电装机总容量显著提高,以屋顶光伏为主要电源的混合能源系统得到大量建设与示范。受外部自然环境影响,光伏发电具有典型的随机波动性,因而混合能源系统存在功率波动问题。现有研究表明,储能是解决该问题的有效途径^[1-2]。文献[3]提出了采用蓄电池与超级电容器相结合的混合储能方式,动态调节微电网的功率平衡,以确保孤网运行时系统的稳定性。文献[4-5]提出了一种含储能的新型光伏并网逆变器,可以就地有效改善光伏发电并网的功率波动。文献[6-7]针对光储电站的不同能量管理策略进行优化,并对储能电池参数进行测试,同时对比分析了不同模式下的功率调节响应时间。

为了解决光储型交直流混合系统应用场景中的光伏单元与储能单元接入和协调运行的问题,通过对交直流混合光储系统的运行模式进行分析,首先,提出一种基于隔离型双向全桥变换器(dual active bridge, DAB)的功率调节拓扑结构;其次,基于功率直接反馈理论设计光伏单元与储能单元的能量协调控制策略;最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建详细模型,完成仿真实验分析。

1 光伏发电功率波动分析

光伏电池的等效电路如图 1 所示。表征该等效电路的数学模型为

$$I = I_L - I_d \left[\exp\left(\frac{q}{nkT} V_T\right) - 1 \right] - \frac{V_T}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$V_T = U + R_s I \quad (2)$$

式(1)、(2)中 I 、 U 分别为光伏电池工作电流、电压; I_L 为光电流; I_d 为反向饱和电流; k 为波尔兹曼常数,其值约为 1.3806×10^{-23} J/K; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为并联电阻; T 为光伏电池温度; n 为二极管参数; q 为电子电荷量。

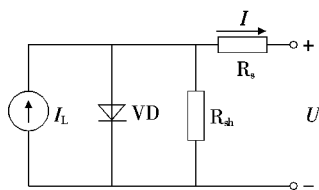
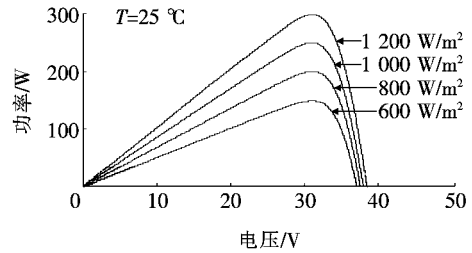


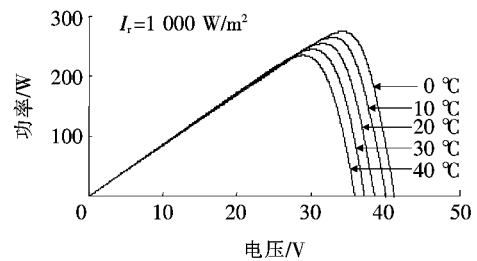
图 1 光伏电池的等效电路

Figure 1 Equivalent circuit of photovoltaic cells

不同环境温度和光照强度下的光伏电池输出功率特性曲线^[8]如图 2 所示。光伏系统的瞬时输出功率随着光照强度和温度变化而波动,例如,当云层遮住阳光时,会降低系统的有功功率输出,此为光伏发电系统的功率波动主要原因。



(a)不同光照强度下的 P-U 曲线



(b)不同温度条件下的 P-U 曲线

图 2 光伏电池输出特性曲线

Figure 2 The output curve of photovoltaic cells

2 交直流混合光储系统组成及运行分析

交直流混合型光储系统的典型结构如图 3 所示,光伏作为主电源,其产生的电能通过 DC/DC 变换器稳定母线电压,并通过 DC/DC 或者 DC/AC 单元变换器进行功率调配^[9],其中,储能单元在该系统中起到吸收能量和释放能量的作用。这种交直流混合型光储系统主要有 3 种工作模式:

- 1)当光伏所发有功功率等于系统负荷所需时,由光伏单独给负荷提供有功;
- 2)当外界环境发生变化、光伏所发有功功率大于等于系统负荷所需时,由储能单元吸收多余的有功功率;
- 3)当外界环境变化、光伏发电输出功率小于负荷需求功率时,储能系统补偿有功缺额。

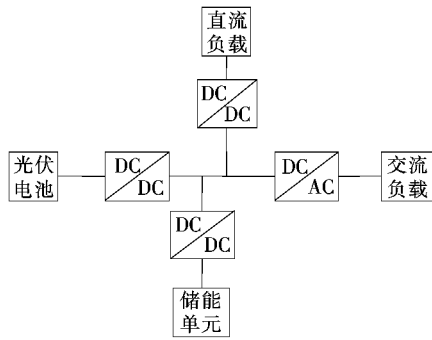


图 3 交直流混合型光储系统结构

Figure 3 Structure of a hybrid energy-storage photovoltaic system

3 基于 DAB 的光储混合系统功率调节器及控制设计

3.1 基于 DAB 的光储混合系统功率调节器

目前,可用于功率调节的双向 DC/DC 变换器主要有非隔离型和隔离型两类。非隔离型含半桥型 Buck/Boost^[10]、交错并联型^[11]等;隔离型双向 DC/DC 变换器拓扑^[12-14]含半桥式、推挽式以及全桥式等。

双向全桥隔离型 DC/DC 变换器由全桥逆变器、高频变压器以及全桥整流器组成,两边均为电压型变换器且为对称结构。通过控制变压器原副边 2 个 H 桥方波电压信号的占空比和相位,可控制 DC/DC 变换器传递的功率大小和方向。双向全桥变换器具有隔离、高功率密度、高效、大电压变比的特点,其拓扑结构如图 4 所示, V_1 、 V_2 分别为输入、输出端的电压, C_1 、 C_2 分别为输入、输出侧直流电容, L 为等效电感,其值为变压器漏感与串联电感之和,高频

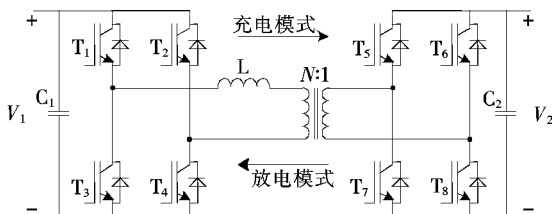


图 4 双向全桥变换器拓扑结构

Figure 4 Structure of bidirectional full bridge converter topology

隔离变压器变比为 $N : 1$, $T_1 \sim T_8$ 为 8 个 IGBT。 V_1 侧 H 桥 T_1 和 T_4 开关状态相同, T_2 和 T_3 与之互补, V_2 侧各 IGBT 开关状态与 V_1 侧对应的 IGBT 开关状态在时序上相差角度 θ 。

当变换器工作在充电模式时,能量从 V_1 流向 V_2 ,此时 $V_2/V_1 = (1/N)(2t_{on}/T)$,其中, t_{on}/T 为 T_1 管占空比;当变换器工作在放电模式时,能量从 V_2 流向 V_1 ,计算方式与充电模式时相同。

将输入、输出侧 H 桥分别等效为电源 u_a 、 u_b ,简化到变压器两端进行分析,如图 5 所示。 u_a 为 V_1 侧交流端口电压, u_b 为 V_2 侧交流端口电压,角频率为 ω 。 i_1 、 i_2 为变压器源副边电流。模型可表示为

$$\begin{cases} i_2 = -Ni_1 \\ u_a = L \frac{di}{dt} + Nu_b \end{cases} \quad (3)$$

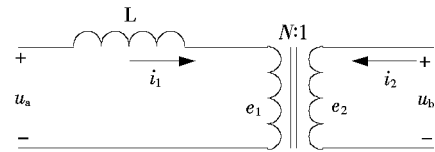


图 5 等效简化分析模型

Figure 5 Equivalent simplified analysis model

对矩形波 u_a 、 u_b 进行傅里叶变换,可得其基波正弦电压的有效值:

$$\begin{cases} U_a = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_1 \\ U_b = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 U_a 、 U_b 分别为 u_a 、 u_b 基波分量的有效值; U_1 、 U_2 为双向变换器两端直流侧电压。

令:

$$\begin{cases} \dot{U}_a = U_a \angle 0^\circ \\ \dot{U}_b = U_b \angle -\theta = U_b \cos \theta - jU_b \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

可以得出变压器原边电流为

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_a - N\dot{U}_b}{j\omega L} = \quad (6)$$

$$\frac{NU_b \sin \theta}{\omega L} + j\left(\frac{NU_b \cos \theta - U_a}{\omega L}\right)$$

变压器副边绕组的复功率为

$$\tilde{S} = \dot{U}_b (-N \dot{I}_1^*) \quad (7)$$

式中 \dot{I}_1^* 为变压器原边电流的共轭值。

变压器副边的有功功率为

$$P = \text{Re}(\tilde{S}) = \frac{8}{\pi^2} \frac{N U_1 U_2 \sin \theta}{\omega L} \quad (8)$$

变压器的副边绕组有功功率与移相角的正弦值成正比。该值为正时,有功功率从变压器的原边流向副边,即副边吸收有功功率;当该值为负时,有功功率从变压器副边流向原边,即副边发出有功功率。

3.2 基于功率直接反馈的光储能量调控策略

将系统所需的负载功率 P_{set} 与光伏系统实时出力 P_{pv} 瞬时作差进行直接反馈,得到储能单元给定功率参考值,即 $P_e = P_{\text{set}} - P_{\text{pv}}$ 。控制算法结构框图如图 6 所示,其中,光伏系统的实时出力 P_{pv} 通过对光伏系统输出电压 U_{pv} 和输出电流 I_{pv} 进行实时采样相乘获取,储能端功率 P_2 通过其电流与电压相乘而获取。

对 DAB 采用一种简单有效的移相 PWM 控制方式:原/副边为频率与占空比相同,而相位不同的方波电压信号,较易实现软开关,控制也比较简单,所以被广泛采用^[15]。其中,移相角作为调节量,变压器两端电压频率为给定量,功率为控制量。移相角由 P_e 与 P_2 的差值经过 PI 调节后得到。该移相控制的工作原理如图 7 所示。

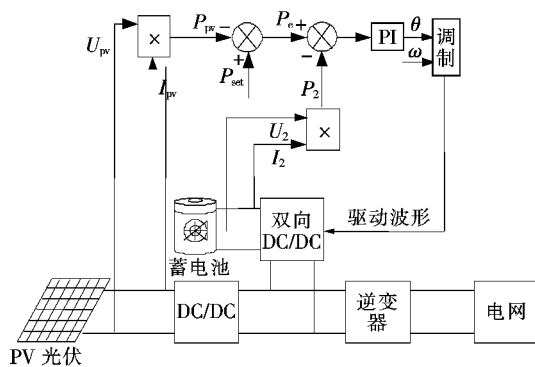


图 6 采用功率直接反馈控制

Figure 6 Block diagram adopting power direct feedback control

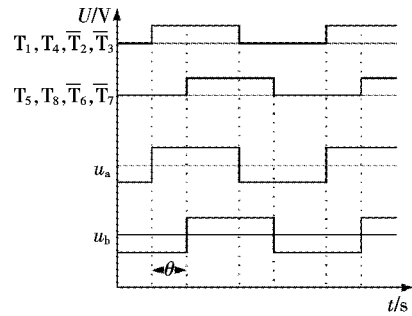


图 7 移相控制工作原理

Figure 7 Working principle of phase-shifting control

4 仿真分析与验证

针对某光储型交直流混合系统,在 MATLAB/Simulink 中搭建详细模型,开展仿真验证研究。设定负荷的需求功率 P_{set} 为 500 kW,仿真时环境温度为 25,初始光照强度为 1 000 W/m²,光伏系统出力为 P_{pv} ,蓄电池储能系统出力为 P_e 。按光伏出力等于负荷所需功率、光伏出力大于负荷所需功率和光伏出力小于负荷所需功率 3 种工况进行仿真分析,仿真结果分别如图 8~10 所示。

1) $t=0\sim 0.4$ s 时光照强度为 1 000 W/m²,此时光伏出力刚好满足负荷功率需求,光伏单独给负载供电,有 $P_{\text{set}} = P_{\text{pv}}, P_e = 0$ 。仿真结果如图 8 所示,在此光照强度下,光伏出力满足负荷需求功率,储能电池处于浮充状态。

2) $t=0.4\sim 0.6$ s 时模拟光照强度增大,从初始光照强度 1 000 上升至 1 200 W/m²,光伏出力大于负荷功率,光伏向负载和储能单元供电, $P_{\text{set}} = P_{\text{pv}} - P_e$,结果如图 9 所示,此时储能单元出力为负值,表示充电状态。

3) 设定 $t=0.6\sim 0.8$ s 时模拟光照强度下降,从 1 200 减小到 800 W/m²,储能单元和光伏系统组成双电源共同向负载输送功率以平抑光伏系统出力的波动, $P_{\text{set}} = P_e + P_{\text{pv}}$ 。仿真结果如图 10 所示,光伏出力不足以满足负载需求,此时储能单元出力为正值,表示放电状态。

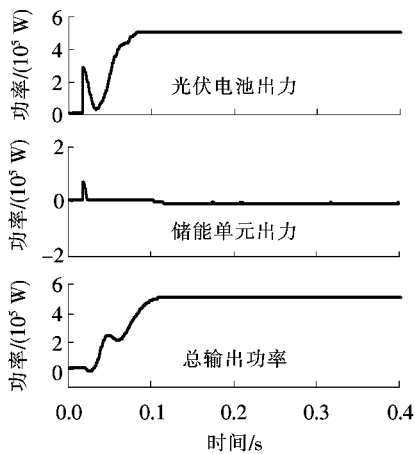


图8 光伏电池单独给负载供电

Figure 8 Curves under the scenario that photovoltaic cells supply power to loads alone

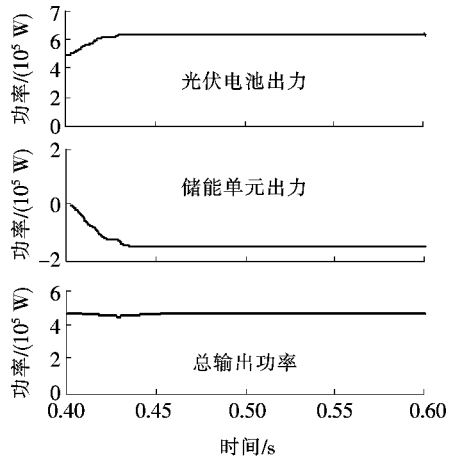


图9 光伏电池给负载和储能单元供电

Figure 9 Curves under the scenario that photovoltaic cells supply power to load and batteries

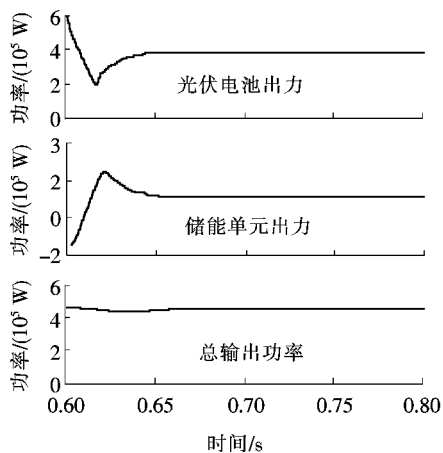


图10 光伏电池和储能单元共同给负载供电

Figure 10 Curves under the scenario that photovoltaic cells and batteries supply power to the load together

5 结语

针对光储型交直流混合系统的光伏出力功率波动平抑问题,提出一种基于隔离型双向全桥功率调节器的直接反馈型功率控制方法。通过 MATLAB/Simulink 建模与仿真分析,结果表明该技术方案能够有效解决此类系统的动态功率平衡,保障系统的稳定。

参考文献:

- [1] 宫娅宁,苏舒,林湘宁,等.独立光伏发电储能系统能量管理与经济调度研究[J].电力科学与技术学报,2017,32(2):3-9+30.
GONG Yaning, SU Shu, LIN Xiangning, et al. Study on energy management and economic dispatch of stand-alone photovoltaic generation system with hybrid energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 3-9+30.
- [2] 张犁,孙凯,吴田进,等.基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J].电工技术学报,2013,28(2):248-254.
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tianjin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [3] 田慧雯,李咸善,陈铁,等.基于混合储能的光伏微电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.
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.
- [4] 邱培春,葛宝明,毕大强.基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(3):29-33.
QIU Peichun, GE Baoming, BI Daqiang. Battery energy storage-Based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 29-33.
- [5] 高志刚,冬雷,廖晓钟.一种带储能功能的新型光伏并网逆变器研究[J].电网技术,2012,36(11):36-40.
GAO Zhigang, DONG Lei, LIAO Xiaozhong. A novel

- grid-integrating inverter with energy storage capability for PV generation system[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 36-40.
- [6] 鲍雪娜,张建成,徐明,等. 基于混合储能的并网光伏电站有功分级控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 115-121.
BAO Xuena, ZHANG Jianchen, XU Ming, et al. Active power hierarchical control strategy of interconnected photovoltaic station based on hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 115-121.
- [7] 靳文涛,徐少华,张德隆,等. 并网光伏电站 MW 级电池储能系统应用及响应时间测试[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2425-2432.
JIN Wentao, XU Shaohua, ZHANG Delong, et al. Application and response time test of MW-level battery energy storage system used in PV power station[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(7): 2425-2432.
- [8] 焦阳,宋强,刘文华. 光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 198-202.
JIAO Yang, SONG Qiang, LIU Wenhua. Practical simulation model of photovoltaic cells in photovoltaic generation system and simulation[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 198-202.
- [9] 毋炳鑫,谢卫华,叶红恩. 交直流混合微电网直流母线电压稳定控制技术[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 62-66.
WU Bingxin, XIE Weihua, YE Hongen. Study on DC bus voltage deviation control autonomy in hybrid AC/DC Micro-Grid[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 62-66.
- [10] 张方华,朱成花,严仰光. 双向 DC-DC 变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 46-49.
ZHANG Fanghua, ZHU Chenghua, YAN Yangguang. The controlled model of bi-directional DC-DC converter[J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(11): 46-49.
- [11] 陆治国,祝万平,刘捷丰,等. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 39-46.
LU Zhiguo, ZHU Wanping, LIU Jiefeng, et al. A novel interleaved parallel bidirectional DC/DC converter[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(12): 39-46.
- [12] 颜湘武,杨利鸣,梁宵,等. 一种高效隔离的双向 DC/DC 变换器[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(4): 13-18.
YAN Xiangwu, YANG Liming, LIANG Xiao, et al. An efficient isolated bi-directional half bridge resonant DC/DC converter[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(4): 13-18.
- [13] 童亦斌,吴峰,金新民,等. 双向 DC/DC 变换器的拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 81-86.
TONG Yinbin, WU Tong, JIN Xinmin, et al. Study of bi-directional DC/DC converter[J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27(13): 81-86.
- [14] 武琳,刘志刚,洪祥. 隔离式双向全桥 DC-DC 变换器的功率控制特性比较与分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 179-187.
WU Lin, LIU Zhigang, HONG Xiang. Comparison and analysis of power control characteristic for isolated bi-directional full-bridge DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 179-187.
- [15] 张国玉,洪超,陈杜琳,等. 面向储能电站调度的光储发电系统运行优化策略研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 50-56.
ZHANG Guoyu, HONG Chao, CHEN Dulin, et al. Strategy research on operation optimization of photovoltaic-energy storage hybrid system based on scheduling of battery energy storage system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 50-56.