

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.06.010

超级电容压缩空气混合储能应用于光伏发电系统的 EMR 建模与控制

黄先进, 郝瑞祥, 张立伟, 游小杰, 郑琼林

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 超级电容和压缩空气构成的混合储能系统, 具有高能量密度、大功率密度、造价低以及使用周期长的优点。混合储能应用于光伏发电系统可稳定电源和负载波动对电网的冲击, 并提高光资源利用率。文中利用宏观能流表示法 (energy macroscopic representation, EMR) 实现超级电容和压缩空气混合储能系统建模, 可以从系统功率、储能容量、能量转换效率等方面确定储能系统的顶层指标设计。利用规则基础控制实现电源和负载的能量管理, 研究 EMR 建模和 IBC 控制, 从能量流通回路发掘控制链, 从顶层设计系统控制方案, 能够从动态视角更准确了解系统的潜能, 仿真实验证明该方案的正确与有效。

关键词: 压缩空气储能; 混合储能; 宏观能流表示法; 能量管理

EMR Modeling and Control for a Hybrid Energy Storage Based on Super-capacitor and Compressed Air Used in PV System

HUANG Xianjin, HAO Ruixiang, ZHANG Liwei, YOU Xiaojie, ZHENG Qionglin

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the high power and energy density, long work cycle and economic feasibility, the hybrid energy storage system based on super capacitors and compressed air is being a promising method for electricity saving. The hybrid energy storage used in PV supply could alleviate the power and load impact on the grid fluctuations. What's more, the utilization ratio of light sources could be improved. Energy macroscopic representation is introduced to model the hybrid energy storage system to guide the top-level design focused on system power, energy capacity, energy transfer efficiency etc. In this paper, the energy management based on Rule Based Control is studied to cover the control link through energy flow. The system's potential could be more accurate understood from the dynamic perspective. The correctness and effectiveness of the proposed modeling method and control strategy are proven by the simulation results.

Key words: compressed air energy storage (CAES); hybrid energy storage; energy macroscopic representation (EMR); energy management

0 引言

截止 2013 年, 世界范围内太阳能光伏发电系统容量达到 139 GW, 比上一年增长 38%, 全球光伏发电至少提供了 160 TW·h 的电量, 约占整个发电量的 0.85%, 中国已经成为继日本和美国之后的第 3 大市场^[1]。太阳能、风能等可再生能源容量不宜准确评估, 并网发电不连续、不稳定、难预测, 会引起供电系

统稳定性、可靠性降低与电能质量变差等问题。对于小容量光伏发电的终端用户, 电力储能系统的使用可保证电力供应的灵活与方便, 用户如果在扩容或者减载时, 相应的储能系统就能发挥作用, 而不需专门申请配电系统的改造, 大大提高用电灵活性。

目前对可再生能源发电的存储, 普遍采用电化学方法, 包括铅酸电池、镍镉电池、锂电池、钠硫电池和钒液流电池^[2]。化学电池的使用周期短, 可回收利用差, 环境友好性不足; 超级电容和飞轮储能也是常

收稿日期: 2014-12-25; 修回日期: 2015-01-28

基金项目: 中央高校基础科研业务费专项资助项目 (2013JBM082)。

Project Supported by Beijing Jiaotong University Science and Technology Foundation (2013JBM082).

被提起的储能技术,其具有较高的功率密度和响应速度,但是其存储能量密度较低,构成成本较高;压缩空气储能技术是近来快速发展的一种储能技术。利用人工高压储气设备存储气体,直接利用高压空气驱动泵机运行,带动发电机发电。压缩空气储能利用空气介质,无污染、无排放,是一种物理储能方式,通过对储能技术特性的比较和分析,可对不同储能技术的应用作出一个大体的评估,对于小功率固定储能应用,关键考察指标是自放电率、锂离子电池和小容量压缩空气储能是比较好的方案;对于小容量系统,特别是有自主能量供给需求的储能应用(如可再生能源发电独网系统),关键指标是自主性。铅酸电池、锂离子电池和小容量压缩空气储能技术都可以满足。建设成本铅酸电池最低,锂离子和小容量压缩空气储能较高。对于中等容量储能应用,如几百 $\text{kW}\cdot\text{h}$,考虑经济性也是首选铅酸电池。考虑环保和运行费用压缩空气储能非常适合^[3-4]。对电能质量改善的储能应用,关键指标是放电功率和循环次数,飞轮储能和超级电容储能比锂离子电池更有优势。

针对可再生能源发电的压缩空气储能,国内外多进行的是发电系统和经济效益的研究分析。文[5]中主要在压缩空气储能火力电站系统开展了研究;文[6、7]中研究了压缩空气储能的经济效益;文[8、9]中研究了液气压缩空气储能技术的效率问题;文[10]中研究了不同循环压缩空气储能技术的热交换和压缩比问题;文[11]中研究了液气压缩空气储能和超级电容配合的系统效率问题。

文中提出了一种新型的压缩空气储能技术,配合超级电容构成混合储能系统, 以实现光伏发电系统的能量存储^[12]。利用宏观能流表示法(EMR)建模,实现多种源系统之间的能量流动控制^[13],采用规则基础控制(RBC)实现混合储能系统中主辅储能系统的特性控制, 以实现储能系统的能量转换效率最大化, 通过仿真和试验验证了该建模方案的有效和控制策略的正确。

1 混和储能系统模型

1.1 光伏发电混和储能系统结构原理

图 1 为应用于光伏发电的超级电容与压缩空气混合储能系统结构示意图。该系统由超级电容、超容变流器、高压储气罐、液压罐、电磁阀、液压泵(马达)、电机、逆变器、光伏发电系统(包括变流器、光伏电池)、直流负载和系统控制器构成。储能状态时,光伏发电量多余的电能根据分配首先存储到超级电容,多余能量驱动电机工作,带动液压泵,通过泵入

液体使空气压缩蓄能;释能状态时,负载除光伏发电网络供电外,还需额外能量注入,此时压缩气体驱动液力马达旋转,带动发电机发电,变流器将电能变成负载所需形式。超级电容可以作为功率补充,通过控制超级电容充放电,可以最大限度平抑直流网压的瞬间波动。

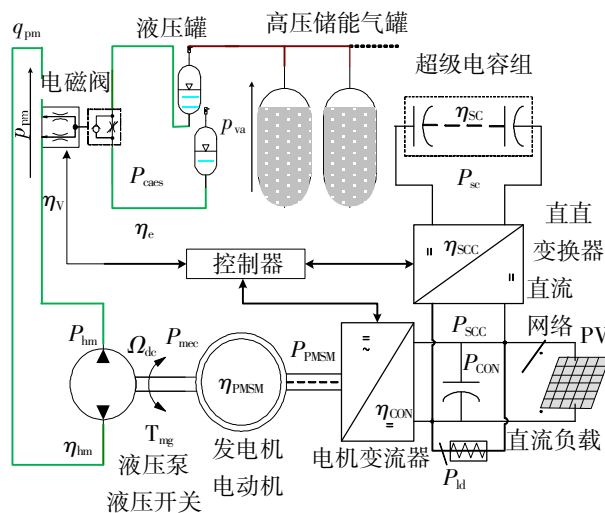


图 1 光伏发电混合储能系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid energy storage based on compressed air and supercapacitor used in PV system

在超级电容液气循环压缩空气混和储能系统(SC-HPCCAES)中,作为主储能系统和机电大惯性环节,压缩空气储能工作时的控制特性较为稳定,混合储能系统的动态特性主要通过超级电容辅助储能系统的控制特性加以体现^[10]。储能系统功率特性是SC-HPCCAES 工作性能的重要指标,由压缩空气储能和超级电容储能的功率调节方式来实现各自性能的发挥。

1.2 能量管理分配策略

应用于光伏发电的混合储能系统采用规则基础控制来实现能量管理和分配。能量管理和控制的依据是电源与负载的瞬时功率差,建立基础规则的着眼点是超级电容储能系统的安全工作区和液气压缩储能系统的转换效率。超级电容系统的规则判据是电容的耐受电压最大值 U_{sc_max} 和最小值 U_{sc_min} ; 压缩空气储能系统的规则判据是液泵/液力开关的最大功率 P_{PH_max} 和最大效率 η_{PH_max} 。图 2 为混合储能系统能量管理和控制策略示意。

混合储能系统应用于光伏发电系统, 根据能量存储和释放两种工况, 考虑源荷之间功率差(剩余功率) $P_{\text{res}} = P_{\text{grid}} - P_{\text{load}}$, 建立 4 种工作规则:

1) 压缩储能, 电源功率过剩, 源荷功率差 $P_{\text{ex}} > 0$, 则控制液气储能系统压缩储能工作, $P_{\text{ph}} = P_{\text{ph_COM}}$ 。如剩余功率大于液气压缩最大功率 $P_{\text{ex}} \geq P_{\text{ph_max}}$, 可分为:

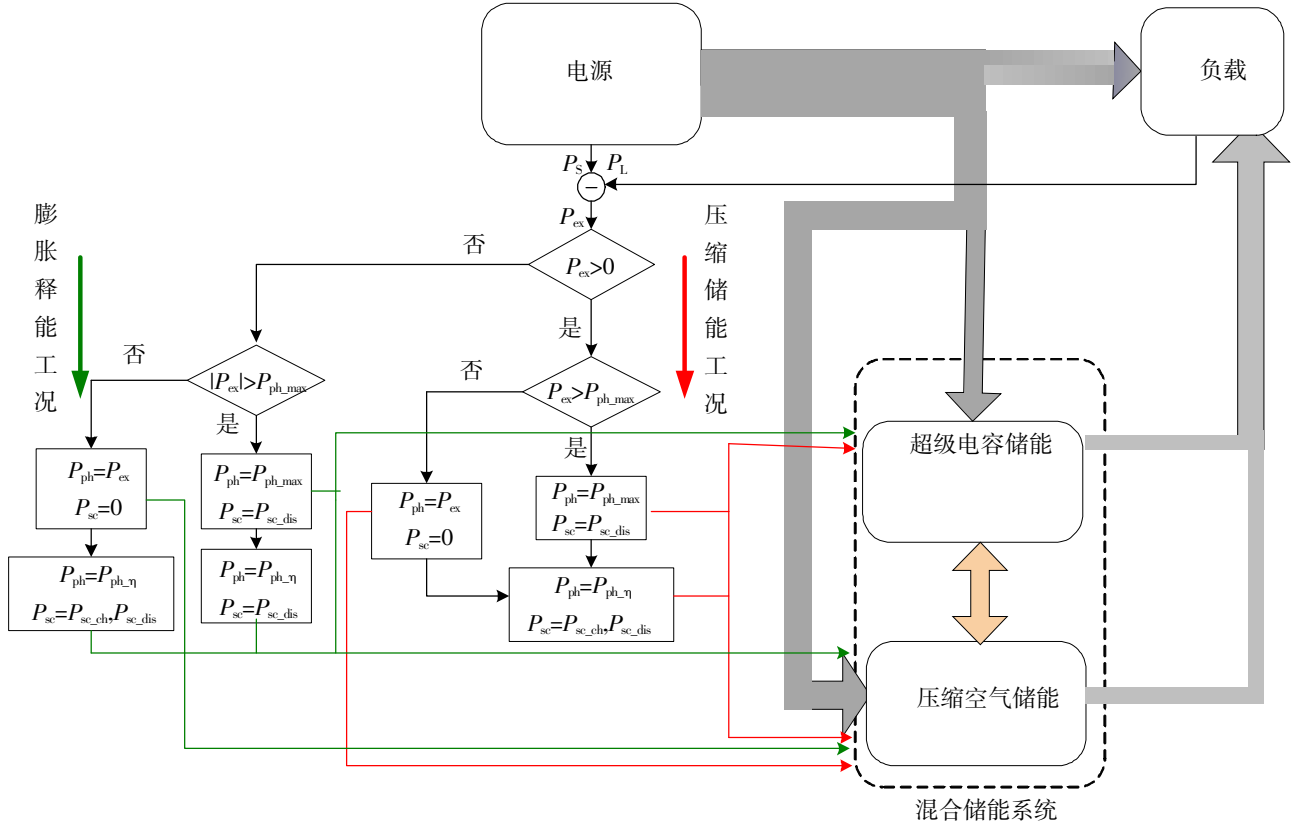


图 2 混合储能系统能量管理和控制流程图

Fig. 2 Control flow diagram of hybrid ES

①液气储能系统按最大功率工作, $P_{ph}=P_{ph_max}$, $\eta_{ph}=\eta_{hspeed}$; ②液气储能系统按最大效率工作, $P_{ph}=P_{ph_hspeed}$, $\eta_{ph}=\eta_{max}$ 。

2) 压缩储能, 剩余功率大于零, 但小于液气压缩系统的最大功率 $P_{ex} < P_{ph_max}$ 。可分为: ①压缩空气储能系统按最大功率工作, 输入功率等于剩余功率, $P_{ph}=P_{ex}$; ②压缩储能系统按对应最大效率点转速工作。

3) 释放发电, 光伏电源功率无法完全支撑负载所需, $P_{ex} \leq 0$ 。液气储能系统释放发电, 即 $P_{ph}=P_{ph_REL}$; 如功率差大于液气压缩最大功率, 即 $-P_{ex} \geq P_{ph_max}$, 可分为: ①液体马达工作于高转速以维持最大功率, $P_{ph}=P_{ph_max}$, $\eta_{ph}=\eta_{hspeed}$; ②液气压缩按最大效率工作, 液体马达工作在一定转速对应的功率, 并非最大功率, 但是保证在该时刻的转换效率最大。

4) 释放发电, 储能系统处于发电释能状态, 欠偿功率小于液气压缩储能最大功率, 可分为: ①液气压缩按最大功率工作, 输出功率等于欠偿功率; ②液气压缩按最大效率工作, 最大效率点对应功率小于欠偿功率。

2 混和储能系统控制

2.1 光伏发电混合储能系统建模

液气压缩超级电容混合储能应用于光伏发电的

系统模型采用宏观能流表示法(EMR)构建, 可简单地反映了系统的能量状态。图 1 描述的系统结构, 外电网、负载和超级电容都是电气性质的源模型, 压缩空气系统为机械热力性质的源模型。电机为无能量积累机电转换器模型, 变流器为无能量积累电气转换器模型, 液泵为无能量积累机械转换器模型。

混合储能系统的能量源 EMR 模型见图 3。文中设定外电源为 PV 发电直流供电系统, 由光伏阵列和 BOOST 变流器输出恒定网压。设定负载为固定负载, 电压电流恒定。此处电源和负载约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq i_{pv} \leq I_G; \\ u_{pv} \equiv U_G \end{cases}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{ll} \equiv I_L \\ u_{dc} \equiv U_{DC} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: i_{pv} 为外电源电流, 最大值限定为 I_G ; u_{pv} 为电源电压, 恒定为 U_G ; i_{ll} 和 u_{dc} 为负载电流电压。



图 3 电网负载 EMR 源模型

Fig. 3 EMR source models of the grid and load

按封闭液气混合压缩空气系统来建立压缩空气源模型, 得出压缩与释放状态的约束条件为

$$\begin{cases} q_{\text{air}} \ln \frac{p_{\text{air}}}{p_a} = \frac{P_{\text{JC}}}{p_a} \\ q_{\text{air}} (1 - C_r)^{\frac{1}{k}} = \frac{(k-1)P_{\text{JE}}}{k p_f} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $C_r = \frac{p_f}{p_{\text{air}}}$; p_{air} 为容器端口压力, 即当前存储空气的压力; q_{air} 为容器端口流量; p_a 为大气环境压力; p_f 为压缩气体目标压力; k 为多变指数; P_{JC} 为压缩功率; P_{JE} 为膨胀功率。

光伏变流器模型约束条件分别为

$$\begin{cases} u_{\text{cc}} = S_{\text{con}} u_{\text{dc}} \\ i_{\text{lc}} = S_{\text{con}} i_{\text{sc}} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: S_{con} 为控制占空比; i_{lc} 为变流器输出电流; u_{cc} 和 i_{sc} 为变流器输入电压电流。

电机变流器为三相桥式电压源逆变器(VSI)^[11], 通过一个开关函数定义每个功率器件的通断状态。函数取值 1 为开通, 值为 0 表示关断。

$$S_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (5)$$

式(5)中: $i \in \{1, 2, 3\}$ 为桥臂数; $j \in \{1, 2\}$ 指同桥臂上下管。可认为开关器件上下两管互补开关, 状态为

$$S_{i1} + S_{i2} = 1 \quad \forall i \in \{1, 2, 3\}. \quad (6)$$

图 4 为变流器的 EMR 模型示意图。对于三相桥式变流器电路, 调节函数可通过开关函数描述。

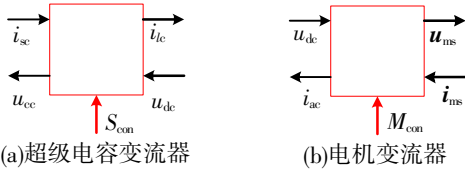


图 4 超级电容变流器和电机变流器的 EMR 模型

Fig. 4 EMR models of the converters for SC and PMSM

$$M = [M_{13} M_{23}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ S_{31} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于电机变流器, 存在直流侧电压 u_{dc} 和电流 i_{dc} , 交流侧线电压 $u_{\text{ms}} = [u_{\text{ms}13}, u_{\text{ms}23}]^T$ 和线电流 $i_{\text{ms}} = [i_{\text{ms}1}, i_{\text{ms}2}]^T$, 变流器输入输出关系描述为

$$\begin{cases} u_{\text{ms}} = M_{\text{con}} u_{\text{dc}} \\ i_{\text{lc}} = M_{\text{con}} i_{\text{ms}} \end{cases} \quad (8)$$

循环液气压缩的阀门控制系统管路结构见图 5。

阀门控制系统由液体电磁阀 T_1, T_2, T_3, T_4 和气体电磁阀 G_{a1}, G_{a2}, G_{a3} 构成。液体电磁阀按照两组互补开关模式工作, T_1, T_4 同时动作, T_2, T_3 同时动作。定义 T_1, T_4 的工作状态为开关量 K_1 , 定义 T_2, T_3 的工作状态为开关量 K_2 。取值 1 表示上电开通, 取值 0 表示断电阻断。

$$\begin{cases} K_i \in \{0, 1\} \\ i \in \{1, 2\} \end{cases} \quad (9)$$

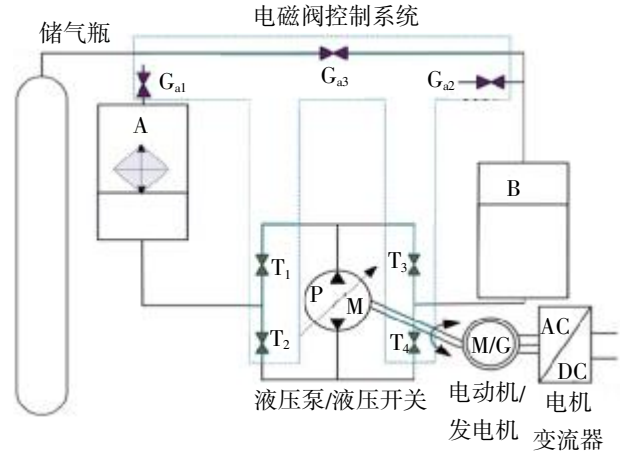


图 5 阀门管路结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of valve and pipe structure

对于气体电磁阀

$$\begin{cases} G_{aj} \in \{0, 1\} \\ j \in \{1, 2, 3\} \end{cases} \quad (10)$$

压缩和预压缩状态时, 阀门控制系统数学模型描述为

$$\begin{cases} q_{va} = K_1 q_{pm} \\ p_{pm} = K_1 p_{va} \\ K_2 = 0, G_{a1} = 1, G_{a2} = 0, G_{a3} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} q_{va} = K_2 q_{pm} \\ p_{pm} = K_2 p_{va} \\ K_1 = 0, G_{a1} = 1, G_{a2} = 1, G_{a3} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(11)、(12)中: q_{va} 为 B 罐液体流量; p_{va} 为 B 罐液体液面压力; q_{pm} 为液泵流量; p_{pm} 为液泵压差。忽略压缩过程中 A 罐的液面大气压力和 A、B 罐由液面差产生的液位压差。

释放和预释放状态时, 阀门控制系统模型为

$$\begin{cases} q_{va} = K_2 q_{pm} \\ p_{pm} = K_2 p_{va} \\ K_1 = 0, G_{a1} = 1, G_{a2} = 0, G_{a3} = 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} q_{va} = K_1 q_{\text{const}} \\ p_{pm} = K_1 p_{\text{const}} \\ K_2 = 0, G_{a1} = 1, G_{a2} = 1, G_{a3} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

不考虑电机中阻尼绕组作用, 建立了转子旋转坐标系 $d-q$ 轴的永磁同步电机模型。Park 坐标变换模型描述为

$$\begin{cases} v_{mdq} = T_{3/2}(\theta) u_{\text{ms}} \\ i_{\text{ms}} = T_{2/3}(\theta) i_{mdq} \end{cases} \quad (15)$$

且有 $T_{3/2}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120^\circ) \end{bmatrix}$, $T_{2/3}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta-120^\circ) \end{bmatrix}$ 。式(15)中: v_{mdq} 为 $d-q$ 轴对应的定子电压向量; i_{mdq} 为对应电流向量; θ 为两相坐标系相对三相坐标系的电位角^[16]。

因为永磁同步电机为非凸极式, $d-q$ 轴对应的等效电感相等, 定义为 L_s 。绕组特性可描述为

$$u_{mdq} = R_s i_{mdq} + L_s \frac{d}{dt} i_{mdq} + e_{sdq} \quad (16)$$

式(16)中: e_{sdq} 为 $d-q$ 坐标下的电机反电势矢量; R_s 为定子电阻。永磁同步电机 EMR 模型中的无能量积累传递单元模型为

$$\begin{cases} e_{sd} = -\omega_{ds} L_s i_{mq} \\ e_{sq} = \omega_{ds} (L_s i_{md} + \psi_r) \end{cases} \quad (17)$$

$$T_{sm} = \frac{3}{2} p_n \psi_r i_{sq} \quad (18)$$

式(17)、(18)中: $i_{mdq} = i_{sdq}$, $\omega_{ds} = p_n \omega_m$; ψ_r 为转子永磁体磁通; ω_m 为转子角速度。永磁同步电机的 EMR 模型见图 6。

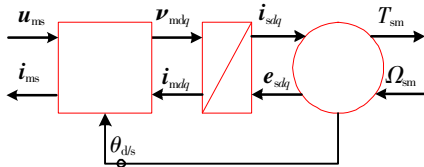


图 6 永磁同步电机 EMR 模型

Fig. 6 EMR model of PMSM

液泵(液压马达)属于无能量积累传递单元选用双向定容积液力泵(液压马达), 数学模型为

$$\begin{cases} q_{pm} = D\Omega_{dc} - k_{leak} p_{pm} \\ T_{mg} = Dp_{pm} / \eta_{mech} \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中: T_{mg} 为输入转矩; Ω_{dc} 为转速; D 为泵容积; k_{leak} 为泄露系数; η_{mech} 为泵机效率。

$$\begin{cases} k_{leak} = k_{HP} / (\nu_f \rho) \\ k_{HP} = \frac{D\Omega_{nom}(1-\eta_v)\nu_{nom}\rho}{p_{nom}} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中: k_{HP} 为哈珀系数; ν_f 为流体运动粘度; ν_{nom} 为流体运动粘度; ρ 为液体密度; p_{nom} 为泵额定工作压力; Ω_{nom} 为泵额定转; η_v 为泵容积效率。

2.2 混合储能系统基础反演控制

根据系统能流通路中的转换链, 可以找出具体的控制链并且设定对应的控制目标, 利用反演控制法, 将控制对象至控制变量进行控制链的反演计算。混合储能系统中主要设计 3 个转换链, 对应的控制变量也有 3 组, 分别是超级电容变流器电压控制, 电机变流器电压控制和循环液气阀门开关控制。

图 7 为超级电容变流器供电部分的 EMR 模型和反演控制框图。图 7 中: 通路 1 为能量转换链; 通路 2 为控制链^[17]。

根据电路图与 EMR 模型可知, 超级电容变流器部分的能量转换链为

$$\begin{matrix} \xrightarrow{S_{con}} u_{sc} \longrightarrow i_{sc} \end{matrix}$$

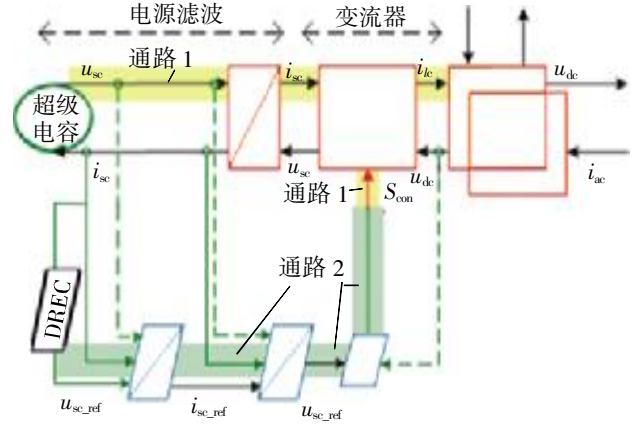


图 7 超级电容变流器 EMR 模型及反演控制框图

Fig. 7 Schematic diagram of IBC in EMR model of supercapacitor converter

从能量转换链可以看出实际是通过控制变流器来实现对超级电容器的电流进行控制, 从而保证超级电容的 SOC 和充放电效率的控制。

通过将转换链反演, 就可得到该部分的控制链:

$$\begin{matrix} \xleftarrow{S_{con_ref}} u_{sc_ref} \xleftarrow{i_{sc_ref}} \end{matrix}$$

引入 P-I 控制器 $C_{SC}(t_1)$ 实现反演控制:

$$u_{sc_ref} = C_{SC}(t_1)(i_{sc_ref} - i_{sc_mes}) + k_{sc} u_{sc_mes} \quad (21)$$

依据观测电压和控制给定电压, 可得到变流器的反演控制:

$$S_{con} = \frac{1}{u_{dc_mes}} u_{sc_ref} \quad (22)$$

图 8 为电机变流器驱动液泵(液压马达)的 EMR 模型和反演控制框图。图 8 中: 通路 1 为能量转换链; 通路 2 为控制链^[13]。

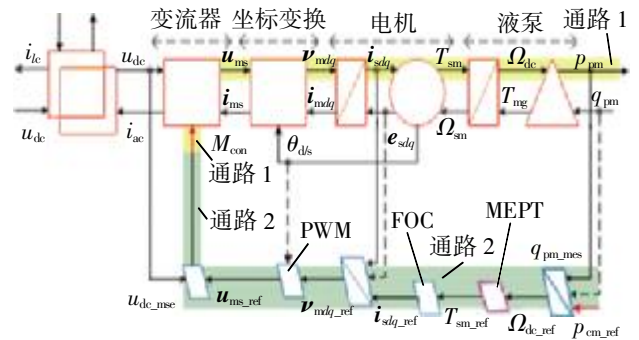


图 8 电机变流器 EMR 模型及反演控制框图

Fig. 8 Diagram of IBC in EMR model of motor converter

根据电气原理图与 EMR 模型可知, 电机变流器驱动液泵部分的能量转换链为

$$\begin{matrix} \xrightarrow{M_{con}} u_{ms} \longrightarrow v_{mdq} \longrightarrow i_{sdq} \longrightarrow T_{sm} \longrightarrow \Omega_{dc} \longrightarrow q_{pm} \end{matrix}$$

通过将能量链反演, 就可得到该部分的控制链:

$$\begin{matrix} \xleftarrow{M_{con_ref}} u_{ms_ref} \xleftarrow{v_{mdq_ref}} \xleftarrow{i_{sdq_ref}} \xleftarrow{T_{sm_ref}} \xleftarrow{\Omega_{dc_ref}} \xleftarrow{q_{pm_mes}} \end{matrix}$$

依据测量所得到的液泵流量和压力差 q_{pm_mes} 和

p_{pm_mes} , 通过 PI 控制得到参考转速 Ω_{dc_ref} 。按照 MEPT 算法取得工作在转速参考值 Ω_{dc_ref} 时, 最大效率点下的参考转矩 T_{sm_ref} 。参考转矩 T_{sm_ref} 通过 FOC 产生 $d-q$ 坐标下参考电流 i_{sdq_ref} 。与计算观测电流 i_{sdq_mes} 和观测电压 u_{sdq_mes} , 引入 PI 控制得到 $d-q$ 坐标参考电压 u_{sdq_ref} 。引入坐标变换 PWM 调制, 得到静止坐标下参考电压 u_{sm_ref} , 再与所观测的直流母线电压 u_{dc_mes} 比较形成控制信号 M_{con_ref} 。

控制链引入 P-I 控制器 $C_{SM}(t_1)$ 实现参考转速 Ω_{dc_ref} 的反演控制:

$$\Omega_{dc_ref} = C_{SM}(t_1)(q_{pm_mes} - q_{pm_mes}) + k_{pm} p_{pm_mes} \quad (23)$$

依据液泵工作时的流量和压差, 可以确定对应的最大效率点 η_{max} 时的参考转矩 T_{sm_ref} , 液泵的模型反演控制链, 引入控制对象:

$$T_{sm_ref} = \frac{D^2}{k_{leak}} k_{pp} \frac{\Omega_{dc_ref}}{\eta_{mech_ref}} \quad (24)$$

控制链引入 FOC 控制策略实现对电机 $d-q$ 坐标下参考电流 i_{sdq_ref} 的反演控制。由永磁同步电机的 EMR 模型反演可得:

$$i_{sq_ref} = \frac{T_{sm_ref}}{1.5 p_n \psi_f} \quad (25)$$

引入 P-I 控制器 $C_{MS}(t_1)$ 实现 $d-q$ 坐标参考电压 v_{mdq_ref} 的反演控制:

$$v_{mdq_ref} = C_{MS}(t_1)(i_{sdq_ref} - i_{sdq_mes}) + k_{ms} e_{sdq_mes} \quad (26)$$

引入 PWM 调制反演控制, 依据观测电压和 $d-q$ 参考电压, 可得到电机变流器的调节指令。变流器控制的反演首先是确定 PWM 调制状态:

$$u_{ms_ref} = T_{2/3}(\theta_{mes}) v_{mdq_ref} \quad (27)$$

式(27)中, θ_{mes} 为两相 $d-q$ 坐标系与三相 abc 坐标系的测算电角度。矢量调制指令 M_{con} 反演可得:

$$M_{con} = \frac{1}{u_{dc_mes}} u_{sc_ref} \quad (28)$$

图 9 为液气循环电磁阀控制的 EMR 模型和反演控制框图。图 9 中: 通路 1 为能量转换链; 通路 2 为控制链。

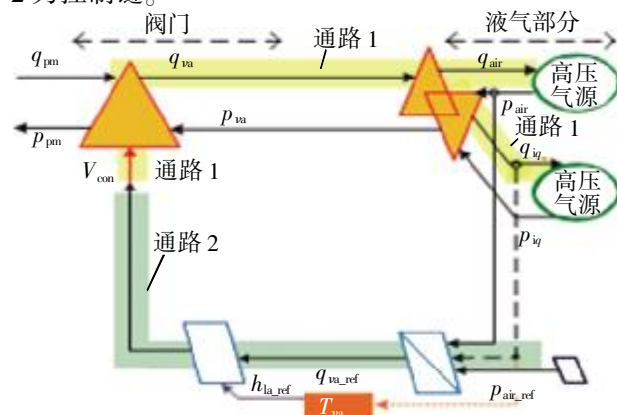


图 9 液气循环压缩电磁阀系统反演控制框图

Fig. 9 Schematic diagram of IBC in EMR model of valves

根据管路图与 EMR 模型可知, 液气循环压缩电磁阀部分能量转换链为

$$\begin{matrix} \xrightarrow{S_{con}} u_{sc} \xrightarrow{i_{sc}} \end{matrix}$$

将转换链反演, 就可以得到此部分的控制链:

$$\begin{matrix} \xleftarrow{i_{sc_ref}} u_{sc_ref} \xleftarrow{S_{con_ref}} \end{matrix}$$

按照控制目标, 电磁阀控单元只有一条控制链, 采集高压液罐间注入液体的流量 q_{liq} 和储能气罐的空气压力 p_{air} , 再加上给定的目标存储压力值 p_{air_ref} , 通过 PI 控制得到液罐间参考流量 q_{va_ref} 。参考流量值 q_{va_ref} 与参考液位值 h_{la_ref} 进行计算分析判断, 采用循环周期判定法(CPI)确定某一循环过程的状态, 输出阀门控制信号。

引入 P-I 控制器 $C_{VA}(t_1)$ 实现反演控制:

$$q_{va_ref} = C_{VA}(t_1)(p_{air_ref} - p_{air_mes}) + k_{va} q_{liq_mes} \quad (29)$$

依据参考流量和参考液位, 可得到阀门系统的反演控制:

$$S_{con} = \frac{1}{u_{dc_mes}} u_{sc_ref} \quad (30)$$

3 系统工况仿真分析

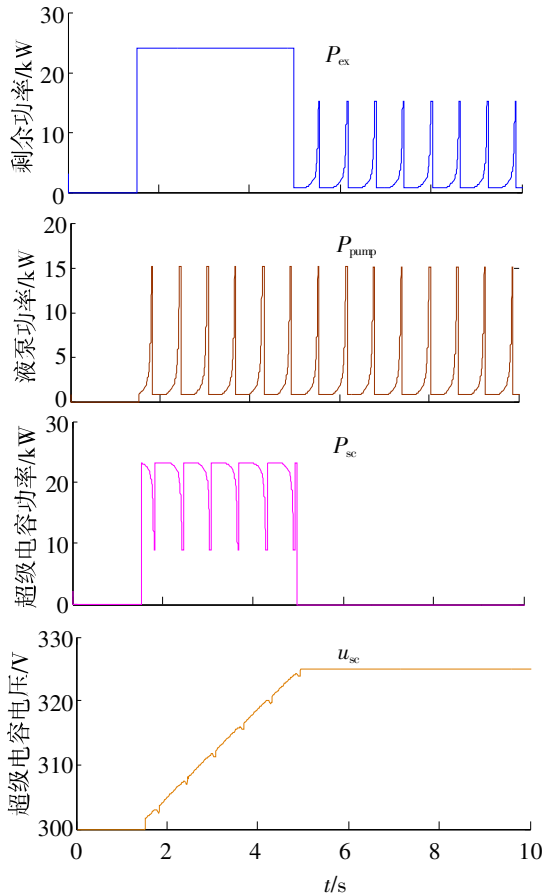
应用于光伏发电的超级电容压缩空气混合储能系统的运行仿真基于表 1 所列的主要参数。假定光伏发电交流系统输出恒压, 负载为变功率载荷, 且负载变化最大功率值可大于压缩空气储能系统额定功率。

表 1 混合储能系统仿真参数表

Table 1 Designed simulation parameters of hybrid ES				超级电容储能			
电源和负载		变流器功		电源	电容	电容	
电源功	电源	负载功	变流器功	电压/V	值/F	电压/V	
率/kW	电压/V	率/kW	率/kW				
16	500	5	15(1+100%)	500(1+30%)	6	320	
压缩空气储能							
电机功	额定转	额定转	液泵排	最大压	液泵功	液灌	
率/kW	速/rpm	矩/(N·m)	量/(cm³·r⁻¹)	力/MPa	率/kW	容量/L	
22	3	300	55	125	48	38	100

图 10 为模拟外部剩余功率大于液泵最大功率时混合储能系统的工况。图 10 中曲线分别对应液泵压缩储能的时外部剩余功率、液泵功率、超级电容功率和超级电容电压。压缩储能系统采取最大效率点控制, 更大程度吸收外部剩余功率, 超级电容配合进行充电储能, 其主要目的是为了更高效转存外部剩余能量, 如图 10 时间轴 4 500 ms 处达到 325 V, 超级电容充满电, 教最大功率点控制更快。

图 11 为外部剩余功率小于液泵最大功率时的工况, 同样工作在最大效率点控制。液气压缩储能

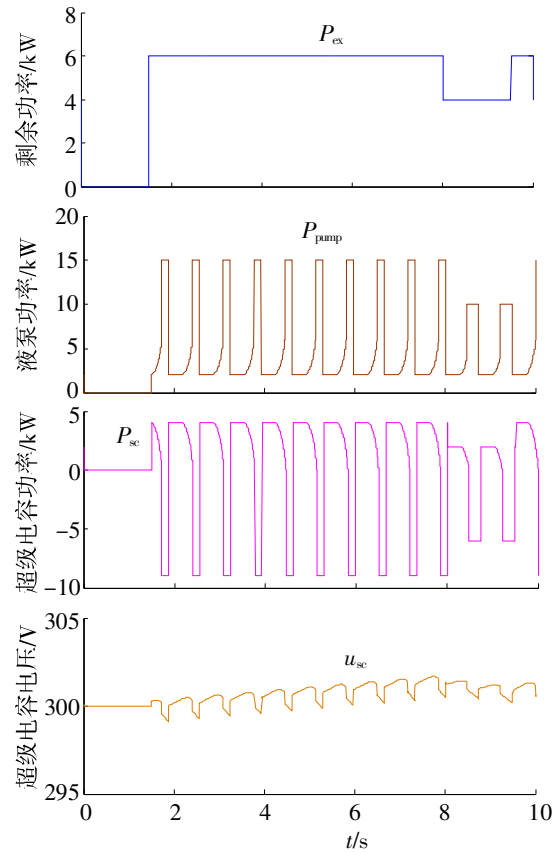
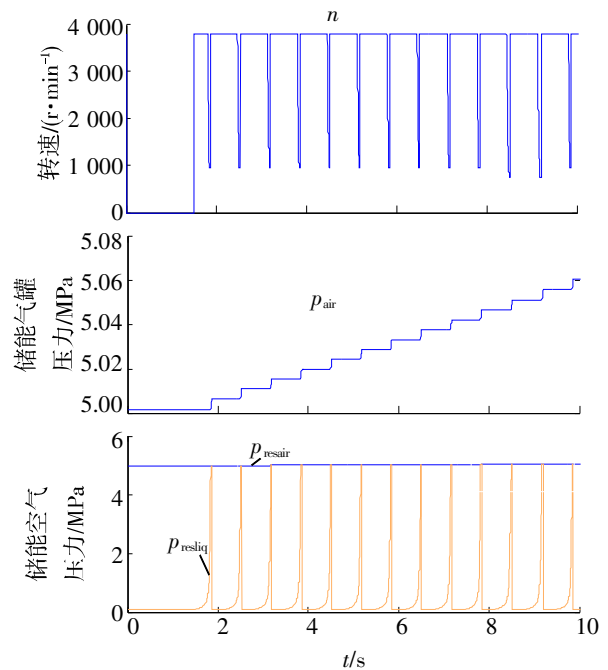
图 10 $P_{ex} > P_{max}$ 时最大效率点控制压缩工况Fig. 10 State under MEPT compressing when $P_{ex} > P_{max}$

为主储能系统, 保证压缩空气主储能系统最大功率储能, 超级电容辅助系统放电补充主储能系统和源荷差的功率输出的不足。超级电容处于充电和放电的状态, 超级电容电压在额定电压上下波动。液气压缩储能无需尽快吸收外部功率, 由超级电容系统来提供能量接收, 该工作方式保证液泵的压缩转换效率较大, 超级电容电压上升较慢。

图 12 为 HPCCAES 系统在 $P_{ex} < P_{max}$ 时, 压缩储能工况下转速、储能气罐压力、储能空气压力对应压缩液体压力变化示意, 工作于最大效率点控制。

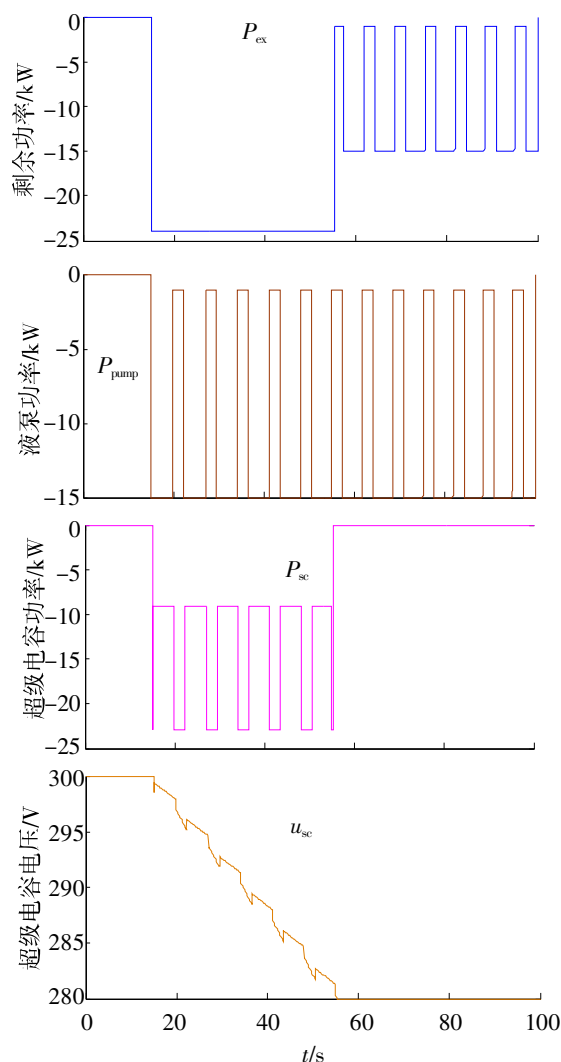
图 13 为模拟了源荷差功率突变, 外部需求功率超过 -24、-20 kW 的两种情况下, 混合储能系统的工作特性。膨胀释能系统采取最大效率点控制, 其控制目的是为了更大程度释放功率确保供给外部需求功率, 超级电容配合进行放电释能。在时间轴 5 350 ms 处达到 280 V, 超级电容放电结束, 较最大功率点控制时更快放完。

图 14 为外部剩余功率小于液泵最大功率时的工况, 最大效率点控制液压马达释能发电, 液气压缩储能为主储能系统, 保证高压气体势能尽可能转变为外部需求能量, 超级电容储能补充在低压时功率输出的不足。该工作方式保证液压马达的驱动转换

图 11 $P_{ex} < P_{max}$ 时 MEPT 压缩工况Fig. 11 State under MEPT compressing when $P_{ex} < P_{max}$ 图 12 $P_{ex} < P_{max}$ 时 MEPT 压缩工况的转速压力Fig. 12 Speed and pressure under MEPT compressing operation when $P_{ex} < P_{max}$

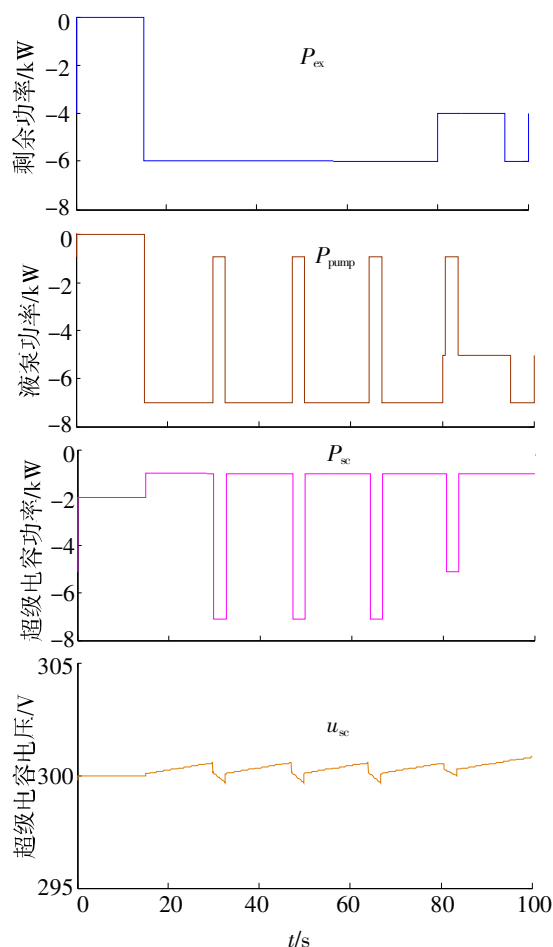
效率较大, 超级电容处于充电和放电的状态, 电容电压下降较慢。

图 15 为超级电容压缩空气混合储能系统配合

图 13 $-P_{\text{ex}} > P_{\text{max}}$ 时最大效率点释放工况Fig. 13 State under MEPT expansion when $-P_{\text{ex}} > P_{\text{max}}$

光伏发电在一天 14 个小时内的工作过程仿真。由上至下分别表示源—负载—源荷差功率波形, 实际剩余功率, 液泵/马达功率, 超级电容功率和超级电容电压。图 15 中: 6–9 时为释放工况, 随着光伏发电功率输出增大, 超级电容放电量减小; 9 时后为储能阶段; 在 13 时左右系统光伏发电功率最大, 负载此时减小, 外部剩余功率较大; 14 时后光伏功率减小, 负载增大, 剩余功率进一步降低, 为了保证压缩空气储能系统的效率, 超级电容释放多余储能, 电压开始下降; 16 时后剩余功率为负, 储能系统转为发电状态。

表 2 比较了光伏系统直接提供负载电源, 接入单独压缩空气储能和混合储能模式下储能系统存储释放的能量和压缩转换总体效率。无储能系统时, 能量的有效利用较低。单独压缩空气储能系统由于功率周期波动的特性, 其压缩过程储能和放电效率较低, 影响了整个能量利用率。混合储能系统较好的满足应用, 通过一些参数的优化, 能够实现高效的利用光伏能量。

图 14 $-P_{\text{ex}} < P_{\text{max}}$ 时最大效率点控制释放工况Fig. 14 State under MEPT expansion when $-P_{\text{ex}} < P_{\text{max}}$

4 结论

1) 压缩空气储能系统与超级电容系统两种储能系统的结合, 可以从功率与能量的角度更好发挥系统的性能。以超级电容的可用电压范围作为判定压缩空气主储能系统和超级电容辅助储能系统配合工作的依据, 设计了规则基础控制的能量管理策略;

2) 采用基于 MATLAB/Simulink 的宏观能量表示法(EMR)建模仿真, 既可以清晰反映系统的硬件组成框架, 又能够描述系统内部的能量通路。文中首先利用 EMR 建立了 SC-HPCCAES 的系统模型, 采用 IBC 控制实现了各子系统的控制链设计, 并对整个系统的能量管理进行了 RBC 控制;

3) 仿真结合了基于规则的能量管理策略, 在储能和释放两种工况下, 设定各两种剩余功率 4 种工况, 对比分析了不同控制策略下的系统工作特性。设定了光伏发电超级电容压缩空气混合储能系统的工作特性, 并进行了全天工作特性仿真, 对比分析了储能系统的能量可利用效率。验证了 EMR 仿真建模方法及控制策略的有效性。

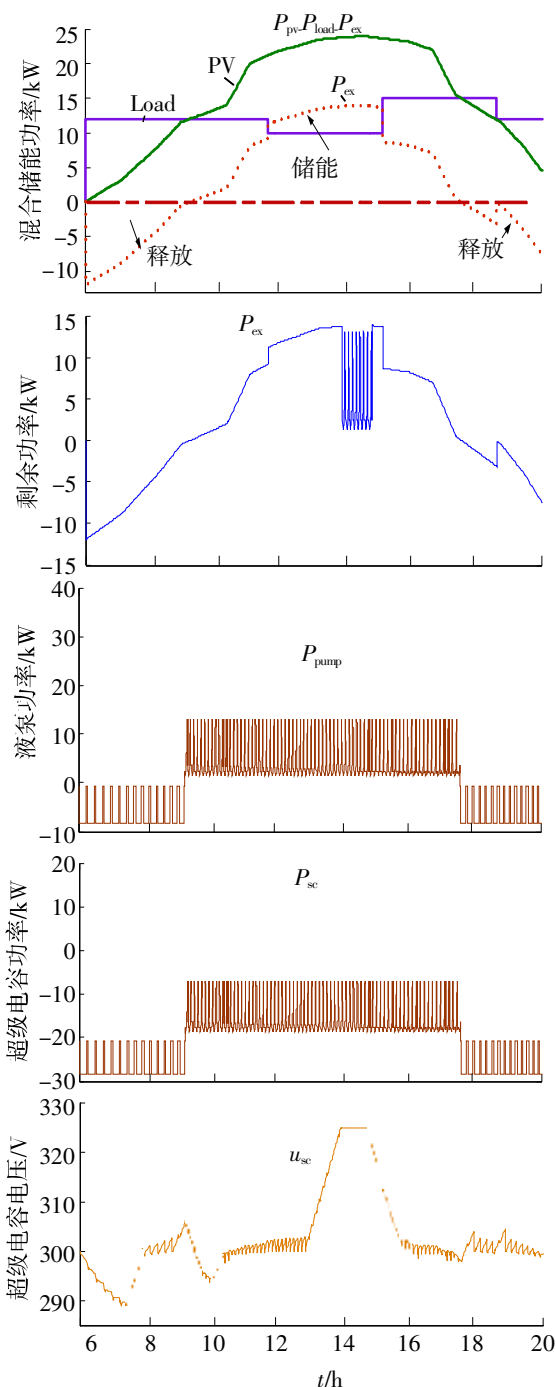


图 15 光伏发电混合储能系统一天工作特性仿真

Fig. 15 Simulation of PV-SC-HPCCAES one day working

参考文献:

- [1] IEC. Electrical energy storage—white paper [R]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2011.
- [2] IEC. Gridintegration of large-capacity renewable energy sources and use of large-capacity electrical energy storage—white paper [R]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2012.
- [3] RASTLER D. Electricity energy storage technology options, a white energy storage technology options, a white

表 2 混合储能系统应用于光伏发电系统效率参数对比

Table 2 Efficiency parameters of SC-HPCCAES hybrid energy storage and others used in PV

参数	无储能	压缩空气储能	超级电容压缩空气混合储能
可利用光能量/(kW·h)	—	154.00	
负载消耗/(kW·h)	—	122.00	
压缩电力做功/MJ	—	54.68	97.20
泵机械功/MJ	—	46.47	84.24
增加气体势能/MJ	—	20.70	47.52
输出电力功/MJ	—	27.30	57.60
马达机械功/MJ	—	43.20	68.40
消耗气体势能/MJ	—	89.50	85.68
总体压缩效率/%	—	37.80	48.40
总体释放效率/%	—	31.10	67.30
能量有效利用率	75.30	83.40	98.70

注: 能量有效利用率定义为实际利用能量比可利用能量与需补充能量之和。

paper primer on applications, costs, and benefits[R]. Palo Alto, USA: Electric Power Research Institute, 2010.

- [4] WALAWALKAR R. Economics of emerging electric energy storage technologies and demand response in deregulated electricity markets [D]. Pittsburgh, USA: Carnegie Mellon University, 2008.
- [5] UNEP. Electrical energy equipment: compressors and compressed air systems [R]. Bangkok, Thailand: United Nations Environment Programme(UNEP), 2006.
- [6] FERTIG E, APT J. Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT [J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2330-2342.
- [7] 谭靖, 李国杰, 唐志伟. 基于压缩空气储能的风电场功率调节及效益分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 33-37.

TAN Jing, LI Guojie, TANG Zhiwei. Design and economic analysis of compressed air energy storage based wind farm power regulation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 33-37.

- [8] KHAMIS A, BADARUDIN Z M, AHMAD A, et al. Development of mini scale compressed air energy storage system [C]//2011 IEEE First Conference on Clean Energy and Technology (CET). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2011: 151-156.
- [9] RUFER A. Energy storage systems properties-case of Supercaps, compressed air energy, vanadium redox flow battery[R]. Lausanne, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2012.
- [10] 黄先进, 郝瑞祥, 张立伟, 等. 压缩空气与超级电容混合储能系统能量控制策略 [J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(4): 56-62.

(下转第 67 页)

- ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35 (12): 101-107.
- [12] Q/GDW 617—2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 2011.
Q/GDW 617—2011 Technical rule for photovoltaic powerstation connected to power grid[S]. 2011.
- [13] 黄会贤, 罗 标, 曹云轩, 等. 山区高压输电线路的防雷对策[J]. 电力建设, 2012, 33(5): 52-55.
HUANG Huixian, LUO Biao, CAO Yunxuan, et al. Lightning protection and renovation of HV transmission line in mountainous area[J]. Electric Power Construction, 2012, 33 (5): 52-55.
- [14] IEC 62305-4—2006 Protection against lightning, Part 4: Electrical and electronic systems within structures[S]. 2006.
- [15] 李开霞, 张金波, 胡 钢. 用相角差法判断金属氧化物避雷器性能优劣的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 23-25.
LI Kaixia, ZHANG Jinbo, HU Gang. Performance evaluation of metal oxide surge arrester with phase difference method[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 23-25.
- [16] 张媛媛, 郑 浩, 施 荣, 等. 35 kV 输电线路避雷器的雷电放电电流和吸收能量[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 118-121.
ZHANG Yuanyuan, ZHENG Hao, SHI Rong, et al. Absorbed discharging energy and lightning discharging current analysis of surge arresters on 35 kV transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 118-121.
- [17] 葛 猛, 韩学坤, 陶安培. 金属氧化物避雷器阀片老化缺陷的诊断及原因分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 145-147.
GE Meng, HAN Xuekun, TAO Anpei. Diagnosing and analysing the aged flaw of MOA valve piece[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 145-147.
- [18] 孙 浩, 李兴文. 500 kV 瓷套式氧化锌避雷器电位分布的[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 23-27.
SUN Hao, LI Xingwen. Finite element calculation and experiment of potential distribution for a 500 kV porcelain zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46 (3): 23-27.
- [19] 李顺尧. 金属氧化锌避雷器测试方法对比与分析[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 94-97.
LI Shun Yao. Comparison and analysis of MOA test methods[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 94-97.
- [20] 王双文, 田建华, 荆建峰. 金属氧化物避雷器在输电线路防雷中的应用[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 36-40.
WANG Shuangwen, TIAN Jianhua, JING Jianfeng. Application of MOA on lightning stroke protection of transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6): 36-40.
- [21] 王兴贵, 李庆玲, 李效珍, 等. 氧化锌避雷器应用研究[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 175-177.
WANG Xingguo, LI Qingling, LI Xiaozhen, et al. Case study of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 175-177.
- [22] 马春华. 线路避雷器和绝缘子串的伏秒特性配合问题研究[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 68-69.
MA Chunhua. Study on voltage-time characteristic coordination between line arrester and insulator string [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 68-69.
- [23] 胡大明, 弥 璞. 线路避雷器应用情况分析和新型线路避雷器的设想[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 59-61.
HU Daming, MI Pu. Present situation of application of line type surge arrester and its further improvement [J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 59-61.

杨磊(1982—), 男, 本科, 工程师, 主要从事雷电防御和雷电监测和预警工作。

谭涌波(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事雷电学、雷电气象学、大气气溶胶、雷电监测预警。

(编辑 赵彩莉)

(上接第 61 页)

- HUANG Xianjin, HAO Ruixiang, ZHANG Liwei, et al. Energy management of the hybrid energy storage system based on super-capacitors and compressed air [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(4): 56-62.
- [11] SEMAIL B L, LHOMME W, BARRADE P. Energetic macroscopic representation (EMR)[R]. Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2011.
- [12] LHOMME W, BOUSCAYROL A. Modelling and emr of an electric vehicle[R]. Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2011.
- [13] 齐 歌. 双三相永磁同步电动机交互饱和模型与特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
QI Ge. Research on dual three-phase permanent magnet brushless ac motors accounting for cross-coupling magnetic saturation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- 黄先进(1980—), 男, 博士, 研究方向为储能技术、电力电子应用技术。
郑琼林(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型功率半导体器件、电力电子应用技术。

(编辑 赵彩莉)