

一种适用于微电网混合储能系统的功率分配策略

蒋 玮¹, 周 赣¹, 王晓东², 杨永标³

(1. 东南大学 电气工程学院 江苏省智能电网技术与装备重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 国网山西省电力公司长治供电公司, 山西 长治 046011;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

摘要: 混合储能系统同时具有功率型和能量型储能设备的优点, 适用于微电网中平抑波动性功率。采用直流母线并联方式的超级电容器和蓄电池混合储能系统, 由蓄电池储能单元稳定直流母线电压, 超级电容器储能单元跟踪参考电流, 从而达到功率的动态分配。在混合储能系统功率损耗模型的基础上, 提出一种兼顾超级电容器荷电状态和储能系统损耗的功率分配策略。将该策略用于光伏发电系统输出功率平抑, 仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 储能; 功率分配; 功率损耗; 荷电状态; 微电网; 控制

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.006

0 引言

由于可再生能源的间歇性、随机性和负荷的持续变动性, 在微电网中配置一定容量的储能设备, 通过灵活快速调整有功/无功功率的吞吐, 可以起到平抑负荷波动、提高供电可靠性、改善电能质量、保持系统稳定性的重要作用^[1-10]。

现有的储能介质可以分为能量型和功率型 2 类, 前者以铅酸电池、锂电池和钠硫电池为代表, 能量密度大、功率密度小、循环次数少、响应速度慢; 后者以超级电容器、超导磁储能和飞轮储能为代表, 功率密度大、能量密度小、循环次数多、响应速度快。单一的储能介质无法满足所有应用场合的需求, 使用多种储能介质组成混合储能系统 HESS (Hybrid Energy Storage System) 成为当前研究和应用的重点。超级电容器作为一种新兴的功率型储能介质, 拥有超过锂电池一个数量级的功率密度 (0.5~25 kW/kg), 并且循环寿命和深度放电等性能均优于普通蓄电池。因此在传统蓄电池储能系统中加入超级电容器可以有效地减少蓄电池充放电循环次数、延长蓄电池的寿命^[11], 蓄电池和超级电容器组成的 HESS 也因其性能互补性强而在电动汽车、轨道交通、新能源发电系统中得到了广泛应用。

在对蓄电池/超级电容器 HESS 的研究中, 不同储能介质之间的功率分配策略是近年来研究的热点

之一。文献[12]提出了根据锂电池充放电状态和超级电容器的荷电状态 SOC (State Of Charge) 动态调整高通滤波器时间常数, 产生功率输出参考值的方法。文献[13]提出了由超级电容器提供全部功率补偿, 蓄电池根据超级电容器端电压来进行能量补充从而减少蓄电池充放电次数的策略。文献[14-15]提出了使用模糊控制算法使超级电容器的荷电状态保持在中间值以应对正向和负向的功率需求。文献[16]提出了将调度期望值和风功率预测值之差作为稳态功率需求由蓄电池进行补偿, 将风力发电机向电网发出的总功率与风功率预测值之差作为动态功率需求由超级电容器进行补偿。文献[17]提出了将蓄电池和超级电容器输出电流比例进行线性分段, 在需要大电流输出的时候由超级电容器等比例地提供瞬时功率。

现有的蓄电池/超级电容器 HESS 功率分配策略大多依据功率响应模型, 以控制超级电容器的荷电状态为目标, 较少从系统功率损耗的角度进行优化。本文在已有的超级电容器和蓄电池 HESS 功率分配策略研究成果的基础上, 提出了一种以超级电容器荷电状态和 HESS 总体损耗为控制目标的实时功率分配策略, 并将其应用在光伏并网发电系统中, 通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了所提出策略的效果。

1 混合储能系统的结构和控制系统

蓄电池/超级电容器 HESS 根据储能元件以及 DC/DC 变换器的并联位置不同分为多种结构^[18], 其中超级电容器和蓄电池分别通过 DC/DC 变换器并联到直流母线的结构由于具有较高的灵活性和可靠性得到了广泛应用^[19-21]。本文也采用这种混合储能结构, 含 HESS 的光伏发电系统如图 1 所示。

收稿日期: 2014-05-21; 修回日期: 2015-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51407025); 国家电网公司科技项目 (电网与用户双向互动服务能力提升关键技术研究, 526408130022); 江苏省科技支撑计划 (社会发展) (BE2013737) Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51407025), China State Grid Technology Program (Key Technologies Research of Promotion of Two-way Interaction Ability between Grid and Consumer, 526408130022) and Jiangsu Province Science and Technology Support Program (Social Development) (BE2013737)

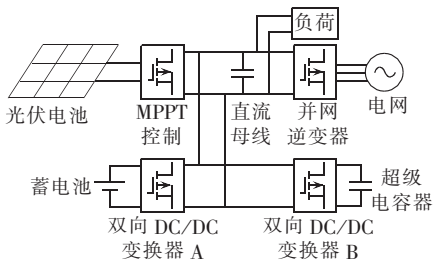


图 1 含 HESS 的光伏发电系统

Fig.1 Photovoltaic generation system with HESS

其等效电路如图 2 所示,HESS 由超级电容器、蓄电池以及双向 DC/DC 变换器 A 和双向 DC/DC 变换器 B 组成,蓄电池连接双向 DC/DC 变换器 A 的低压侧构成蓄电池储能单元,超级电容器连接双向 DC/DC 变换器 B 的低压侧构成超级电容器储能单元,2 个双向 DC/DC 变换器均采用双向 Buck/Boost 变换器拓扑,其高压侧并联到直流母线,由蓄电池储能单元负责稳定直流母线电压 u_{bus} 。分布式电源通过发电侧变换器连接到直流母线,其产生的功率供给直流负荷,多余的功率通过并网逆变器输送到电网中。光伏发电系统和负荷产生的波动性功率由 HESS 进行平抑,平抑目标可以通过低通滤波器^[10]或计算有功功率对每分钟平均值的偏移量^[9]等方法获取,可以将波动功率的平抑目标等效为直流母线上的电流源 i_{total} ,仿真和实验中使用程控电流源代替。储能系统协调控制器根据蓄电池闭路电压 u_{bt}^{cc} 、超级电容器闭路电压 u_{sc}^{cc} 、蓄电池储能单元输出电流 $i_{bt,out}$ 、超级电容器储能单元输出电流 $i_{sc,out}$ 、超级电容器荷电状态 SOC_{sc} 和 i_{total} 计算出超级电容器储能单元输出的电流参考值 $i_{sc,out}^*$,本文重点讨论 $i_{sc,out}^*$ 的生成。

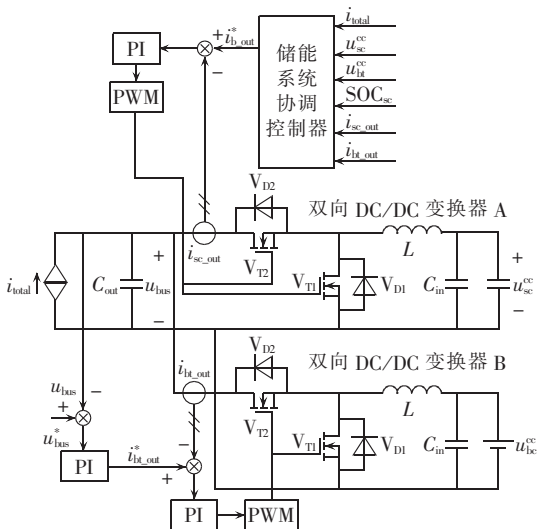


图 2 HESS 等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of HESS

如图 2 所示,由于蓄电池能量密度大而且端电压波动小,因此并联蓄电池的双向 DC/DC 变换器

A 使用电压电流双 PI 环控制稳定直流母线电压 u_{bus} ,双向 DC/DC 变换器 B 使用 PI 控制器控制超级电容器储能单元输出电流 $i_{sc,out}$ 跟踪储能系统协调控制器计算出的参考值 $i_{sc,out}^*$ 。由于双向 DC/DC 变换器的并联结构,因此由蓄电池储能单元输出的电流为 $i_{bt,out} = i_{total} - i_{sc,out}$ 。

2 系统功率损耗

2.1 系统功率损耗构成

HESS 功率损耗的构成如图 3 所示,蓄电池和超级电容器输出的功率 $P_{bt,in}$ 和 $P_{sc,in}$ 分别在储能介质内部产生内损耗 $P_{loss,bt}$ 和 $P_{loss,sc}$ 后减小为 $P_{bt,out}$ 和 $P_{sc,out}$,双向 DC/DC 变换器上再产生损耗 $P_{loss,conv,bt}$ 和 $P_{loss,conv,sc}$,最后输出功率 P_{total} 。

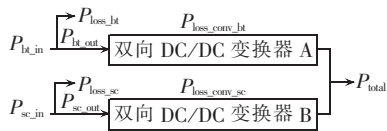


图 3 HESS 的功率损耗

Fig.3 Power loss of HESS

2.2 储能介质内损耗

蓄电池可以使用一个由可控开路电压源 u_{bt}^{oc} 和内阻 R_{bt} 组成的改进型 Shepherd 模型来描述^[18],其中:

$$u_{bt}^{oc} = E_0 - K \frac{Q}{Q - i_c t_c} + A e^{-B i_c t_c} - i_c t_c \quad (1)$$

其中, E_0 为蓄电池初始电压(V); K 为极化电压(V); Q 为容量(A·h); A 为指数区幅度; B 为指数区时间常量的倒数(A/h); i_c 为充放电电流(A); t_c 为进行充放电的截止时间(s)。

蓄电池模型还应考虑倍率容量,蓄电池的等效放电电流 i_{eq} 与实际放电电流 i 之间的关系为:

$$i_{eq} = i^\gamma \quad (2)$$

其中, γ 为 Peukert 常数,根据电池类型不同,其取值范围为 1.05~1.3。

由式(2)可知,蓄电池应该避免大电流放电,否则其荷电状态将快速下降。蓄电池闭路电压 u_{bt}^{cc} 与开路电压 u_{bt}^{oc} 的关系为:

$$u_{bt}^{cc}(t) = u_{bt}^{oc}(t) + R_{bt} i(t) \quad (3)$$

蓄电池的内损耗 $P_{loss,bt}$ 主要由蓄电池输出电流 $i_{bt,in}$ 在内阻 R_{bt} 上产生:

$$P_{loss,bt}(t) = i_{bt,in}^2(t) R_{bt} \quad (4)$$

较为精确的超级电容器模型由 3 个不同时间常数的阻容单元并联组成,使用复杂模型主要的目的是为了描述超级电容充放电过程的非线性及充放电之后的电压自恢复特性,主要影响充放电瞬间的暂态过程^[23],本文研究的功率分配时间尺度以小时计,

因此一阶模型可以描述其输出特性。由于自放电损耗不是由超级电容器输出电流引起的,频繁充放电的电流在漏电阻上引起的功率损耗可以忽略^[24],其对超级电容器输出电流分配计算影响不大,因此可以认为超级电容器输出电流 i_{sc_in} 引起的内损耗 P_{loss_sc} 主要由串联等效电阻 R_{sc} 产生^[25]:

$$P_{loss_sc}(t) = i_{sc_in}^2(t) R_{sc} \quad (5)$$

超级电容器闭路电压 u_{sc}^{cc} 与开路电压的 u_{sc}^{oc} 关系可以表示为:

$$u_{sc}^{cc}(t) = u_{sc}^{oc}(t) + R_{sc} i(t) \quad (6)$$

2.3 变换器功率损耗

HESS 中起到连接储能介质和直流母线的双向 Buck/Boost 变换器使用脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)控制,当图 2 中 V_{T1} 工作、 V_{T2} 截止时,变换器工作在 Boost 模式,储能介质向直流母线输出功率。当 V_{T1} 截止、 V_{T2} 工作时,变换器工作在 Buck 模式,储能介质从直流母线吸收功率。变换器上的功率损耗 $P_{loss_conv_x}$ 由导通损耗 $P_{loss_cond_x}$ 和开关损耗 $P_{loss_swit_x}$ 组成:

$$P_{loss_conv_x} = P_{loss_cond_x} + P_{loss_swit_x} \quad (7)$$

其中, x 表示 sc 或 bt。

开关损耗主要由开关管开通和关断过程中电压和电流的交叠造成,双向 DC/DC 变换器的开关损耗 $P_{loss_swit_x}$ 可以近似表示为:

$$P_{loss_swit_x} = u_{bus} f_s \left| \frac{i_{x_out}}{1-D} \right| (t_r + t_f) \quad (8)$$

其中, u_{bus} 为直流母线电压; f_s 为变换器的开关频率; i_{x_out} 为双向 DC/DC 变换器 A 或 B 的输出电流; D 为变换器的占空比; t_r 和 t_f 分别为开关管的上升和下降时间。

导通损耗主要由变换器输出电流在电感上的铜损和开关管导通阻抗上产生的功率造成,双向 DC/DC 变换器 A 和双向 DC/DC 变换器 B 的导通损耗 $P_{loss_cond_x}$ 可以表示为:

$$P_{loss_cond_x} = \left(\frac{i_{x_out}}{1-D} \right)^2 [R_L + DR_{Q1} + (1-D)R_{Q2}] \quad (9)$$

其中, R_L 为电感导线电阻; R_{Q1} 和 R_{Q2} 分别为开关管 V_{T1} 和 V_{T2} 的导通电阻。双向 DC/DC 变换器占空比与电流电压关系可以表示为:

$$i_{x_in} = \frac{i_{x_out}}{1-D} \quad (10)$$

$$u_{bus} = \frac{u_{sc}^{cc}}{1-D} \quad (11)$$

3 功率分配策略

为了储能系统的安全运行,并且充分利用 HESS 的存储容量,本文提出的 HESS 功率分配策略的目标包括:

a. 稳定直流母线电压 u_{bus} , 这一目标由第 1 节中描述的双向 DC/DC 变换器 A 电压电流双环控制器完成;

b. 超级电容器储能单元平抑功率波动中的高频部分;

c. 尽量减小 HESS 的功率损耗;

d. 避免超级电容器荷电状态的快速波动。

电流指令中的高频和低频分量可以使用滑动平均滤波 MAF(Moving Average Filter)法进行分离^[17],设 i_{total} 的采样频率为 f_i ,时间窗口宽度为 T ,则一个时间窗口中可采集到 $N = T f_i$ 个点,将这些点存储在缓存 $i_{total}(n)$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$) 中,当窗口移动到 $n = t$ 处, $i_{total}(t)$ 进入缓存, $i_{total}(t-N)$ 从缓存中清除,然后对缓存中的数据取平均值得到新的输出,滑动平均滤波算法可以表示为:

$$\bar{i}_{total}(t) = \frac{1}{N} [N i_{total}(t-1) + i_{total}(t) - i_{total}(t-N)] \quad (12)$$

对于固定的 f_i ,时间窗口 T 的大小决定了滤波效果, T 越大则带宽越窄, T 越小则带宽越宽,可以根据蓄电池和超级电容器的频率响应特性来确定 T 并得到滑动平均滤波函数,从而分离高频电流分量 i_{high_freq} 如式(13)所示:

$$i_{high_freq}(t) = i_{total}(t) - \bar{i}_{total}(t) \quad (13)$$

由于超级电容器的内阻远小于蓄电池,并且功率吞吐能力强,因此在超级电容器荷电状态较高的情况下,多使用超级电容器进行功率交换可以降低 HESS 的整体功率损耗 P_{loss_hess} 。因此 t 时刻的超级电容器电流指令 $i_{sc_out}^*(t)$ 中还可以包含一定比例的低频电流 $\bar{i}_{total}(t)$,即:

$$i_{sc_out}^*(t) = i_{high_freq}(t) + k(t) \bar{i}_{total}(t) \quad (14)$$

其中, $k(t) = \frac{i_{sc_out}(t)}{\bar{i}_{total}(t)}$ 为低频电流中超级电容器输出部的比例系数, $0 < k(t) < 1$ 。根据式(4)、(5)、(7)~(11), t 时刻的混合储能系统功率损耗 P_{loss_hess} 为:

$P_{loss_hess}(t) = P_{loss_bt}(t) + P_{loss_sc}(t) + P_{loss_conv_bt}(t) + P_{loss_conv_sc}(t) =$

$$\begin{aligned} & i_{bt_in}^2(t) R_{bt} + i_{sc_in}^2(t) R_{sc} + u_{bus} f_s |i_{bt_in}(t)| \times \\ & (t_r + t_f) + u_{bus} f_s |i_{sc_in}(t)| (t_r + t_f) + \\ & i_{bt_in}^2(t) \left[R_L + \left(1 - \frac{u_{bt}^{cc}}{u_{bus}} \right) R_{Q1} + \frac{u_{bt}^{cc}}{u_{bus}} R_{Q1} \right] + \\ & i_{sc_in}^2(t) \left[R_L + \left(1 - \frac{u_{sc}^{cc}}{u_{bus}} \right) R_{Q1} + \frac{u_{sc}^{cc}}{u_{bus}} R_{Q1} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$i_{sc_in}(t) = \frac{u_{bus}}{u_{sc}^{cc}} (k(t) \bar{i}_{total}(t) + i_{high_freq}(t))$$

$$i_{bt_in}(t) = \frac{u_{bus}}{u_{bt}^{cc}} (1 - k(t)) \bar{i}_{total}(t)$$

通过在一个采样周期内对 HESS 电压、电流的实时采样,可以获得功率损耗对 k 的函数 $P_{loss_hess}(k)$,

使用二次插值法^[22]可以取该函数在(0,1)区间中的局部最优解 $P_{loss_hess_min}$,此时 $k=k_{min}$ 。

由于对于同样的功率输出,超级电容器的损耗代价较之蓄电池更低,因此 $P_{loss_hess}=P_{loss_hess_min}$ 时, k_{min} 可能很大,甚至接近于1。超级电容器储能单元的能量远小于蓄电池储能单元,过大的 k_{min} 将使 HESS 处于功率输出状态时超级电容器快速放电,其荷电状态迅速下降,在 HESS 处于功率输入状态时超级电容器将迅速充电,其荷电状态迅速上升。超级电容器的荷电状态快速波动将降低其功率吞吐能力,因此进一步引入补偿系数 β :

$$\beta=\begin{cases} 0.5+0.5\times\frac{SOC_{sc}-SOC_{sc_min}}{SOC_{sc_max}-SOC_{sc_min}} & i_{sc_out}>0 \\ 0.5+0.5\times\frac{SOC_{sc_max}-SOC_{sc}}{SOC_{sc_max}-SOC_{sc_min}} & i_{sc_out}<0 \end{cases} \quad (16)$$

其中, SOC_{sc} 为超级电容器当前的荷电状态; SOC_{sc_max} 和 SOC_{sc_min} 分别为超级电容器荷电状态的上限和下限; β 用于修正 k_{min} ,使得式(17)成立。

$$k_{act}=\beta k_{min} \quad (17)$$

由此获得超级电容器储能单元电流指令 $i_{sc_out}^*$:

$$i_{sc_out}^*=k_{act}\bar{i}_{total}+i_{high_freq} \quad (18)$$

由式(13)、(14)可知, $i_{sc_out}>0$ 即超级电容器储能单元输出功率时,若超级电容器荷电状态接近上限,由根据尽量减小 HESS 损耗的原则,输出 $k_{min}\bar{i}_{total}+i_{high_freq}$,之后随着荷电状态下降,输出电流下降,当荷电状态下降至接近下限时,超级电容器储能单元输出 $0.5k_{min}\bar{i}_{total}+i_{high_freq}$;同理当 $i_{sc_out}<0$ 即超级电容器储能单元输入功率时,若超级电容器荷电状态接近下限,则超级电容器储能单元输出 $k_{min}\bar{i}_{total}+i_{high_freq}$,之后随着荷电状态的上升,输入电流减小,当荷电状态上升至接近上限时,超级电容器储能单元输出 $0.5k_{min}\bar{i}_{total}+i_{high_freq}$ 。由此可见补偿系数 β 起到了通过控制超级电容器储能单元输出电流限制超级电容器荷电状态快速波动的作用。最后通过限幅使超级电容器的输出功率不超过允许的极值,超级电容器电流指令 i_{sc_out} 的生成过程如图 4 所示。

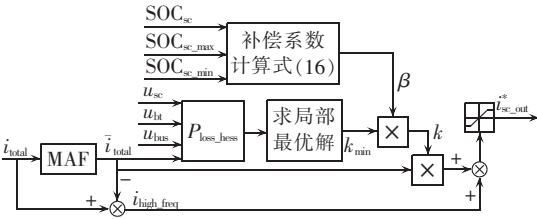


图 4 超级电容器输出电流指令的生成

Fig.4 Generation of super capacitor current command

4 仿真算例分析

为了验证所提出的 HESS 功率分配策略的有效

性,使用 MATLAB/Simulink 仿真平台建立了如图 2 所示的光伏发电系统模型并进行了仿真。仿真参数如下:超级电容器串联 RC 模型为 45 V、3 F、0.1 Ω;蓄电池为 48 V、1 A·h、0.8 Ω,初始荷电状态为 100%,直流母线电压为 48 V,直流侧电感为 0.05 mH,直流侧电容为 1 600 μF,开关频率为 20 kHz,MOSFET 上升时间为 32 ns,下降时间为 20 ns,超级电容器荷电状态下限和上限分别为 $SOC_{sc_min}=0.25$ 、 $SOC_{sc_max}=0.95$ 。

光伏发电系统数据来自于 2012 年 6 月 1 日江苏宏宝光伏 1 号逆变器,其 24 h 总有功功率曲线如图 5 所示,光伏阵列采用 6 节光伏电池并联连接,在标准温度为 25 ℃、光照强度为 1 000 W/m² 条件下,光伏阵列开路电压为 21.75 V,短路电流为 28.5 A,逆变器功率为 1 000 W。根据表 1 所示的国家电网公司对于光伏电站接入电网技术规定中对小型光伏电站有功功率变化限制的规定^[20]确定功率平抑目标得到的 HESS 总输出电流 i_{total} 如图 6 所示。

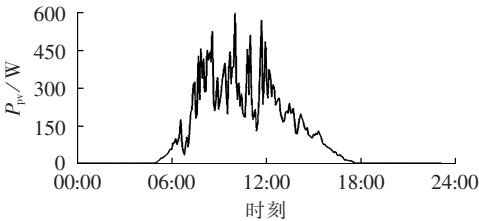


图 5 宏宝 1 号光伏逆变器功率输出曲线
Fig.5 Output power curve of Hongbao no.1 photovoltaic inverter

表 1 光伏电站有功功率变化最大限值
Table 1 Maximum active power change of photovoltaic power station

电站类型	有功功率变化最大限值/MW	
	10 min	1 min
小型	装机容量	0.2
中型	装机容量	装机容量/5
大型	装机容量/3	装机容量/10

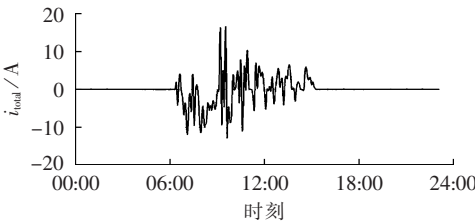
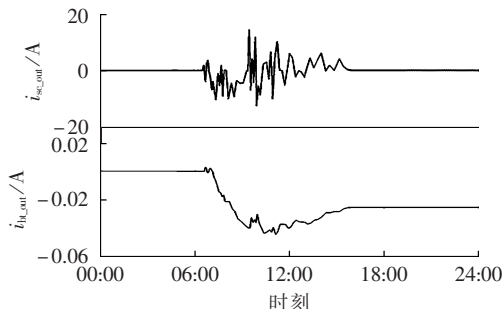


图 6 HESS 补偿电流命令

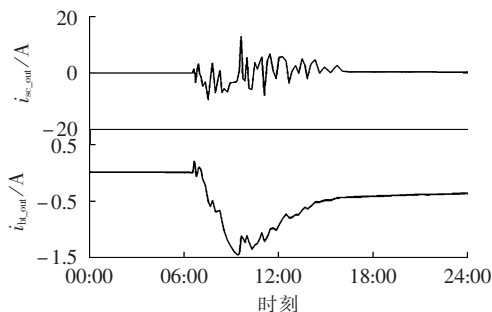
Fig.6 Compensation current command of HESS

重点将本文提出的功率分配策略与低通滤波器功率分配策略进行了比较。图 7(a)所示的是使用本文提出的功率分配后超级电容器输出电流指令与蓄电池输出电流指令,图 7(b)所示的是使用低通滤波法进行功率分配后超级电容器输出电流指令与蓄电池输出电流指令。可以看出由于进行了针对功率损耗的优化,使用本文提出的策略时,蓄电池储能单元

输入的电 流更 小,超 级电 容 器 承 担 了 更 多 的 充 放 电 电 流。尽 管 如 此,从 图 8 所 示 的 超 级 电 容 器 与 超 级 电 容 器 荷 电 状 态 波 形 以 及 图 9 所 示 的 HESS 能 量 损 耗 波 形 可 以 看 出,使 用 本 文 提 出 的 策 略,完 成 功 率 补 偿 后 超 级 电 容 器 荷 电 状 态 在 90% 左 右,能 量 损 耗 不 足

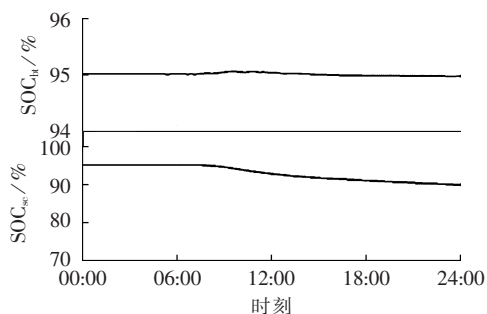


(a) 本文提出策略

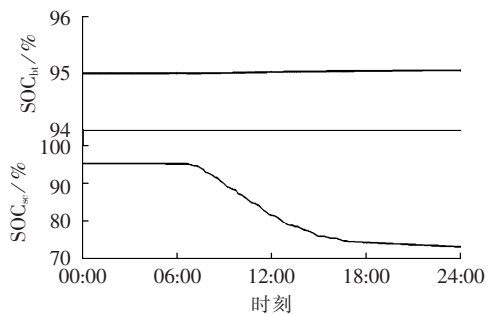


(b) 低通滤波法

图 7 超级电容器、蓄电池电流指令波形
Fig.7 Waveform of current command for super capacitor and battery

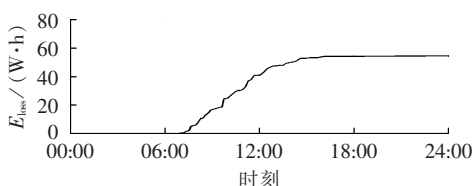


(a) 本文提出策略

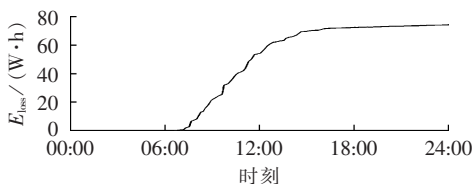


(b) 低通滤波法

图 8 超级电容器、蓄电池荷电状态波形
Fig.8 Waveform of SOC for super capacitor and battery



(a) 本文提出策略



(b) 低通滤波法

图 9 HESS 能量损耗波形

Fig.9 Waveform of HESS energy loss

60 W·h。而使用低通滤波法的超级电容器荷电状态仅仅剩余不足 75%,能量损耗超过 70 W·h。因此,本文所提出的功率分配策略全方位优于传统低通滤波法。

5 结论

本文针对平抑波动性功率的需求,研究了超级电容器和蓄电池 HESS。结合 HESS 功率损耗模型,提出了以维持超级电容器荷电状态和减小储能系统整体损耗为目标的功率分配算法。与传统低通滤波功率分配策略相比,本文提出的算法可以有效地控制功率损耗、提高 HESS 的效率,同时合理地维持超级电容器的荷电状态。

参考文献:

[1] 周林,黄勇,郭珂,等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(7):147-152.
ZHOU Lin,HUANG Yong,GUO Ke,et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control,2011,39(7):147-152.

[2] BARTON J P,INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion,2004,19(2):441-448.

[3] 唐西胜,邓卫,齐智平. 基于储能的微网并网/离网无缝切换技术[J]. 电工技术学报,2011,26(增刊 1):279-284.
TANG Xisheng,DENG Wei,QI Zhiping. Research on grid-connected/islanded seamless transition of microgrid based on energy storage[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2011,26(S1):279-284.

[4] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):4-17.
DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin,et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):4-17.

[5] 李斌,宝海龙,郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):8-15.

- LI Bin,BAO Hailong,GUO Li. Strategy of energy storage control for island microgrid with photovoltaic and energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):8-15.
- [6] 冯兴田,张丽霞,康忠健. 基于超级电容器储能的工作条件及控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):84-89.
- FENG Xingtian,ZHANG Lixia,KANG Zhongjian. Working conditions and control strategy of UPQC based on supercapacitor energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):84-89.
- [7] 钟宇峰,黄民翔,叶承晋. 基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):114-121.
- ZHONG Yufeng,HUANG Minxiang,YE Chengjin. Multi-objective optimization of microgrid operation based on dynamic dispatch of battery energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):114-121.
- [8] 唐西胜,邓卫,李宁宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):99-103,108.
- TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):99-103,108.
- [9] 石庆均,江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):76-82.
- SHI Qingjun,JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):76-82.
- [10] 熊雄,杨仁刚,李建林,等. 多元复合储能系统在含微电网配电网中的容量配比[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):40-47.
- XIONG Xiong,YANG Rengang,LI Jianlin,et al. Capacity configuration of multi-element composite energy storage system in distribution system with microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):40-47.
- [11] DOUGAL R,LIU S,WHITE R. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies,2002,25(1):120-131.
- [12] 李逢兵,谢开贵,张雪松. 基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):70-75.
- LI Fengbing,XIE Kaigui,ZHANG Xuesong. Control strategy design for hybrid energy storage system based on charge/discharge status of lithiumion battery[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):70-75.
- [13] 于芑,赵瑜,周玮,等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(24):35-40.
- YU Peng,ZHAO Yu,ZHOU Wei,et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control,2011,39(24):35-40.
- [14] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):1-6.
- DING Ming,LIN Gende,CHEN Zinian,et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(7):1-6.
- [15] 王富虹,曹军,邱家驹,等. 一种用于分布式发电系统的有功功率补偿模型[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):94-98.
- WANG Fuhong,CAO Jun,QIU Jiaju,et al. An active power compensation model for grid-connected generation system[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(8):94-98.
- [16] 蒋平,熊华川. 混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):122-127.
- JIANG Ping,XIONG Huachuan. A control scheme design for smoothing wind power fluctuation with hybrid energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):122-127.
- [17] ZHANG Yu,JIANG Zhenhua. Dynamic power sharing strategy for active hybrid energy storage systems[C]//2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC 2009). Dearborn,USA: IEEE,2009:558-563.
- [18] ALLGRE A,TRIGUI R,BOUSCAYROL A. Different energy management strategies of Hybrid Energy Storage System (HESS) using batteries and supercapacitors for vehicular applications [C] //2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC 2010). Lille,France:IEEE,2010:1-6.
- [19] WONG J,IDRIS N,ANWARI M,et al. A parallel energy-sharing control for fuel cell-battery-ultracapacitor hybrid vehicle [C]//IEEE ECCE 2011. Phoenix,USA:IEEE,2011:2923-2929.
- [20] ROMAUS C,BOCKER J,WITTING K,et al. Optimal energy management for a hybrid energy storage system combining batteries and double layer capacitors[C]//IEEE ECCE 2009. San Jose,USA:IEEE,2009:1640-1647.
- [21] 张国驹,唐西胜,齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化,2011,35(20):24-28.
- ZHANG Guojun,TANG Xisheng,QI Zhiping. Design of a hybrid energy storage system of leveling off fluctuating power outputs of intermittent sources[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(20):24-28.
- [22] BRENT R P. Algorithms for minimization without derivatives [M]. [S.l.]:Prentice-Hall,Englewood Cliffs,1973.
- [23] 盖晓东,杨世彦,雷磊,等. 改进的超级电容建模方法及应用[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(2):172-175.
- GAI Xiaodong,YANG Shiyun,LEI Lei,et al. Advanced ultracapacitor modeling method and applications[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010,36(2):172-175.
- [24] 郝国亮. 超级电容荷电状态计算方法的研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- HAO Guoliang. Research on super-capacitor state of charge calculation method [D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.
- [25] LALDIN O,MOSHIRVAZIRI M,TRESCASES O. Optimal power flow for hybrid ultracapacitor systems in light electric vehicles [C]//2001 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix,AZ,Germany:IEEE,2011:2916-2922.

作者简介:



蒋 玮(1982—),男,江苏盐城人,讲师,博士,主要研究方向为电力电子技术及其在微电网中的应用(E-mail:jiangwei@seu.edu.cn)。

(下转第 52 页 continued on page 52)

Bidirectional DC/DC converter based on PWM plus dual phase-shift control for microgrid storage system

YAN Kun, WANG Hui, QI Wenlong, TAN Xingguo

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: In order to eliminate the harmful influence of voltage fluctuation existing in the energy storage devices and DC bus of microgrid energy storage system on the converter operation and the energy loss caused by the circulating power, a control strategy of PDPS (PWM plus Dual Phase-Shift) is proposed based on the topology of bidirectional DC/DC converter with full-bridge at the primary side and Boost half-bridge at the secondary side. The improvements of converter operating characteristics brought by the proposed strategy during the converter port voltage fluctuation are analyzed. As the single H-bridge dual phase-shift control may completely eliminate the circulating power throughout the phase-shift range only when the converter port voltage is matched, the PWM control is applied to improve the effect of circulating power elimination for enhancing the system operational efficiency in wide variation range of port voltage. The mathematical converter model with PDPS control strategy is established, and its characteristic is compared with that of the converter model with traditional phase-shift control strategy. The PDPS control strategy for microgrid energy storage system is designed, the simulation model is built, the control effect is comparatively analyzed, and its effectiveness is verified.

Key words: microgrid; electric converters; bidirectional DC/DC converter; energy storage; pulse width modulation; phase-shift control; dual phase-shift; circulating power

(上接第 43 页 continued from page 43)

Power allocation strategy of hybrid energy storage system for microgrid

JIANG Wei¹, ZHOU Gan¹, WANG Xiaodong², YANG Yongbiao³

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Smart Grid Technology & Equipment, School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Grid Changzhi Electric Power Supply Company, Changzhi 046011, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: As the HESS (Hybrid Energy Storage System) has the advantages of both power-based and energy-based energy storage devices, it is suitable for microgrid to smooth the power fluctuation. An HESS with parallel super capacitor and battery is adopted. The battery unit is used to stabilize the DC bus voltage while the super capacitor unit is used to track the reference current, which realizes the dynamic power allocation. A power allocation strategy is proposed based on the power loss model of HESS, which considers the state of charge of super capacitor as well as the power loss of HESS. It is applied to a photovoltaic generation system and the simulative results prove its effectiveness.

Key words: energy storage; power allocation; power loss; state of charge; microgrid; control