

模块化 VRB-EC 混合储能系统配置与控制的优化

李军徽¹,朱星旭¹,严干贵¹,穆 钢¹,王芝茗²,罗卫华²

(1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012;

2. 国网辽宁省电力有限公司,辽宁 沈阳 110000)

摘要:提出了一种适用于全钒液流电池-电化学电容器(VRB-EC)混合储能系统(HESS)的控制策略,分析了 EC 的最优配置数量及 HESS 的最小成本。根据风电预测数据设计 HESS 总充放电功率,通过设定 EC 的动作区间以降低对 VRB 的损耗,通过排序法实现对 VRB 各单元充电任务的合理分配。基于某风电场 30 d 实测及预测数据,仿真分析了 EC 配置数量对 HESS 成本的影响,得到了 HESS 的最优配置及最小成本,为工程应用中 VRB-EC 混合储能系统运行方式的制定和配置的选择提供了参考依据。

关键词:风电;预测;储能;全钒液流电池;电化学电容器;分组控制;优化

中图分类号: TM 71;TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.010

0 引言

风力发电以其无污染、一次能源可永久续用等优点成为发展低碳经济的重要选择。但是风能具有随机性、间歇性和不可准确预测性^[1-2],而制定风电场出力计划主要以预测数据为依据,导致无法实现风电场实时出力对计划出力的跟踪,因此要多接纳风电就需要通过调整常规电源来补偿风电预测误差以实现电网的供需平衡^[3-4]。这必然会导致系统旋转备用容量的增加,造成燃料的浪费,从而违背发展低碳经济的初衷。

储能由于能够实现对风电功率的时空平移而被认为是可调控风电出力的一种有效手段^[5-6]。受经济约束,能量型储能介质由于循环寿命有限而难以承担对风电功率的频繁调控任务^[7-8]。受技术条件约束,功率型储能介质由于能量密度较低而难以承担对风电功率长时间的调控任务^[9-10]。混合储能系统 HESS(Hybrid Energy Storage System)——功率型-能量型储能介质构成的储能系统,具有能量密度高、循环寿命长等优点,可完成长时间对风电功率的频繁调控任务。

在 HESS 实际应用中,主要关注储能介质的选

择、控制策略以及配置方法的研究,以实现 HESS 成本的最小化。全钒液流电池 VRB(Vanadium Redox flow Battery)与其他能量型储能介质相比具有设计灵活、循环寿命长等优势,被认为是作为 HESS 能量型储能介质的最佳选择之一^[11];电化学电容器 EC(Electrochemical Capacitor)技术条件较为成熟,一直被作为 HESS 功率型储能介质使用,因此本文选取 VRB-EC 作为储能介质。关于 HESS 控制策略已有大量文献做了研究,文献[12-15]所设计的 HESS 控制策略可实现对风电出力的快速调控,同时尽量避免电池不必要的充放电,但仅从技术性层面验证了控制策略的可用性。对此,相关文献基于 HESS 控制策略计算其投资成本,文献[16]基于荷电状态设计的模糊控制策略,根据机会约束规划模型计算 HESS 配置。文献[17]权衡储能系统的技术性能和经济性能,通过遗传算法得到 HESS 的优化配置结果。文献[18]对比了单一储能方式和混合储能方式实现同一技术目标时的技术效果和成本投入。文献[19]建立了风电功率预测误差的风-储模型,可以在一定概率水平下平抑风电功率预测误差带来的功率波动。

本文针对 VRB-EC 组成的 HESS,提出一种考虑 VRB 分组控制的 HESS 控制策略,并分析了 EC 的最优配置数量。根据风电场日预测出力设计 HESS 总充放电功率,设定 EC 的动作区间以降低 VRB 的损耗,通过排序法实现对 VRB 各单元快速、合理的调控。基于所提控制策略分析了 EC 配置数量对 HESS 成本的影响,最终得到 HESS 的最优配置及最小成本,研究结果对 VRB-EC 组成的 HESS 在工程中的应用具有理论指导作用。

收稿日期:2013-05-16;修回日期:2014-03-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA-05A112);国家自然科学基金资助项目(60934005,51207018);吉林省教育厅“十二五”科技项目(吉教科合字[2012]89 号);东北电力大学博士点基金资助项目(BSJXM-201205)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A112),the National Natural Science Foundation of China(60934005,51207018),Jilin Provincial “12th Five-Year Plan” Science and Technology Project([2012]89) and the Research Fund for the Doctoral Program of Northeast Dianli University (BSJXM-201205)

1 HESS 结构设计

HESS 结构如图 1 所示。图中, $P_{\text{wind}}(t)$ 和 $P_{\text{out}}(t)$ 分别为 t 时刻经 HESS 补偿前、后的风电功率; $P_{\text{ref}}(t)$ 为 t 时刻风电预测功率; $P_{\text{HESS}}(t)$ 、 $P_{\text{BESS}}(t)$ 和 $P_{\text{EC}}(t)$ 分别为 t 时刻 HESS、电池和 EC 的充电功率。

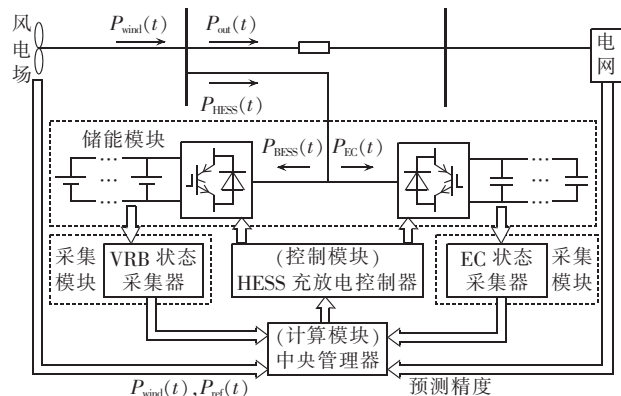


图 1 HESS 结构图

Fig.1 Structure of HESS

本文设计的 HESS 由储能模块、数据采集模块、计算模块和控制模块组成。储能模块由若干 VRB 单元和 EC 单元组成,各单元可独立充放电;数据采集模块由 VRB 及 EC 状态采集器构成,负责采集各储能单元的充放电状态,并将状态反馈给计算模块;计算模块由中央管理器构成,可根据反馈信号、风电数据和电网侧要求计算各储能单元的充放电功率,并将命令下发控制模块;控制模块由 HESS 充放电控制器构成,可根据计算模块下发的命令完成对各储能单元的充放电控制。

本文所述的 HESS 工作原理综合考虑了对风电的控制要求和储能系统自身的工作状态,可在完成充放电任务的同时达到其自身各充放电单元之间的功率优化分配。

2 HESS 控制策略设计

2.1 HESS 总目标功率的确定

调度部门主要根据风电场预测出力制定其出力计划,但风电出力具有不可准确预测性,可采用储能系统实时补偿风电出力,相当于提高了风电出力的预测精度,对减少系统备用容量、提高系统运行的经济性和安全性具有重要意义。

本文以降低风电并网功率与预测功率的差值为目标设计 HESS 总充电功率,风电并网功率与预测功率的差值 $\mu(t)$ 表示如下:

$$\mu(t) = P_{\text{out}}(t) - P_{\text{ref}}(t) = P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{HESS}}(t) - P_{\text{ref}}(t) \quad (1)$$

若电网侧要求 $\mu(t)$ 不超过设定值 $\varepsilon(t)$,则有:

$$\max \{ |P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{HESS}}(t) - P_{\text{ref}}(t)| \} \leq \varepsilon(t) \quad (2)$$

即:

$$P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{ref}}(t) - \varepsilon(t) \leq P_{\text{HESS}}(t) \leq$$

$$P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{ref}}(t) + \varepsilon(t) \quad (3)$$

其中, $\varepsilon(t)$ 在不同时刻取值不同,在负荷腰荷时段系统旋转备用容量较为充足, $\varepsilon(t)$ 取值偏大,负荷峰谷时段则反之。

根据式(3)可确定 HESS 充电功率取值范围如图 2 中阴影区域所示,图中, $P_{\text{wind}} - P_{\text{ref}} = \{\dots, P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{ref}}(t), \dots\}$, 即满足 $\mu(t)$ 为零的 HESS 充电功率; $P_{\text{HESS-up}} = \{\dots, P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{ref}}(t) + \varepsilon(t), \dots\}$, 即满足 $\mu(t)$ 不超过设定值 $\varepsilon(t)$ 的 HESS 充电功率上限; $P_{\text{HESS-down}} = \{\dots, P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{ref}}(t) - \varepsilon(t), \dots\}$, 即满足 $\mu(t)$ 不超过设定值 $\varepsilon(t)$ 的 HESS 充电功率下限; t 为采样时刻。

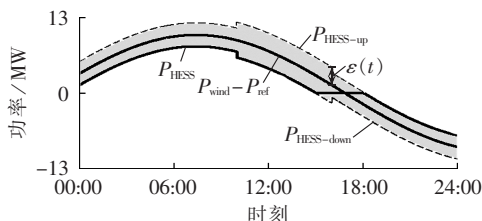


图 2 HESS 充放电功率设计

Fig.2 Design of HESS charging/discharge power

本文以充放电功率最小为原则,可确定 HESS 的充电功率曲线如图 2 中 P_{HESS} 所示,即:

$$P_{\text{HESS}} = \begin{cases} P_{\text{HESS-down}} & P_{\text{HESS-down}} > 0 \text{ 且 } P_{\text{HESS-up}} > 0 \\ 0 & P_{\text{HESS-down}} > 0 \text{ 且 } P_{\text{HESS-up}} < 0 \\ P_{\text{HESS-up}} & P_{\text{HESS-down}} < 0 \text{ 且 } P_{\text{HESS-up}} < 0 \end{cases}$$

除此之外,由于 VRB 和 EC 充放电效率小于 1,其长时间工作会出现“少充多放”的情况,因此在负荷腰荷时段由电网向 HESS 充电以校正其剩余能量。

2.2 HESS 功率分配策略设计

2.2.1 VRB 与 EC 之间功率分配策略

VRB 与 EC 相比最大循环次数较少,由 EC 承担 $P_{\text{HESS}}(t)$ 中幅值较小且频繁波动的功率成分。EC 能量密度较低,因此由 VRB 承担长时间的充放电任务。控制策略设计如下。

当 $P_{\text{HESS}}(t) < P_{\text{EC,N}}$ 时,有:

$$\begin{cases} P_{\text{EC}}(t) = P_{\text{HESS}}(t) \\ P_{\text{BESS}}(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_{\text{EC,N}}$ 为所配置 EC 的额定功率,由第 3 节所述 HESS 配置方法计算得到。

当 $P_{\text{HESS}}(t) > P_{\text{EC,N}}$ 时,有:

$$\begin{cases} P_{\text{BESS}}(t) = P_{\text{HESS}}(t) \\ P_{\text{EC}}(t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

则 t 时刻 VRB 和 EC 能量计算公式如下。

充电时:

$$E_{\text{BESS}}(t) = E_{\text{BESS}}(t - \Delta t) + P_{\text{BESS}}(t) \Delta t \eta_{\text{BESS,C}} \quad (6)$$

$$E_{EC}(t) = E_{EC}(t - \Delta t) + P_{EC}(t) \Delta t \eta_{EC,C} \quad (7)$$

放电时:

$$E_{BESS}(t) = E_{BESS}(t - \Delta t) + \frac{P_{BESS}(t) \Delta t}{\eta_{BESS,D}} \quad (8)$$

$$E_{EC}(t) = E_{EC}(t - \Delta t) + \frac{P_{EC}(t) \Delta t}{\eta_{EC,D}} \quad (9)$$

其中, Δt 为采样时间间隔; $\eta_{BESS,C}$ 和 $\eta_{EC,C}$ 、 $\eta_{BESS,D}$ 和 $\eta_{EC,D}$ 分别为 VRB 和 EC 的充/放电效率; $E_{BESS}(t)$ 和 $E_{EC}(t)$ 分别为 t 时刻 VRB 和 EC 的能量, 假定其初始值为 0。

EC 的能量密度较低, 故引入 EC 的容量约束:

$$-P_{EC,N}/50 \leq E_{EC}(t) \leq P_{EC,N}/50 \quad (10)$$

2.2.2 VRB 分组控制策略

由于 VRB 最大循环次数有限, 若所有 VRB 单元接受同样的调度指令, 不仅会造成对 VRB 不必要的损耗, 而且不利于对风电出力的精确控制, 因此需将 $P_{BESS}(t)$ 在各 VRB 控制单元之间合理分配, 其原则为: 某一时刻投入运行的 VRB 单元个数最少; HESS 运行期间各 VRB 单元的累计运行时间均等; 算法计算速度满足实时控制要求。具体的调度策略如下。

如图 3 所示, $n_{BESS,i}$ 为第 i 个 VRB 单元的累计充放电次数, 当充电周期开始时, 将 VRB 单元按 $n_{BESS,i}$ 大小进行排序, $n_{BESS,i}$ 多者居右, 在此充电周期内, 从左至右选择 VRB 单元投入运行, 使其总充电功率刚好满足控制要求; 当放电周期开始时, 将 VRB 单元按 $n_{BESS,i}$ 进行排序, $n_{BESS,i}$ 多者居左, 在此放电周期内, 按从右至左顺序选择 VRB 单元投入运行, 使其总放电功率刚好满足控制要求。此算法可避免 VRB 单元不必要的充放电, 并避免工作任务集中于部分 VRB 单元。

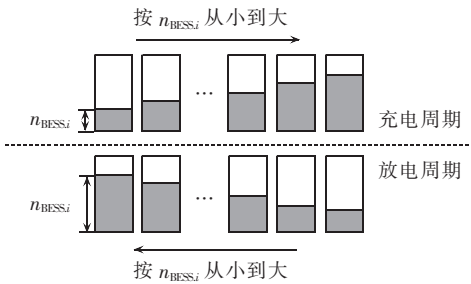


图 3 VRB 单元分组控制

Fig.3 Group control of VRB cell

3 HESS 优化配置方法

优化 HESS 配置目的为最小化其投资成本, 储能电站每年的平均成本计算方法如下:

$$M = (M_b + M_{BESS} + M_{EC}) / N_{year} \quad (11)$$

其中, N_{year} 为储能电站运行年限; M_b 、 M_{BESS} 和 M_{EC} 分别为储能电站建设成本、电池和 EC 的投资成本, 根

据经验本文 M_b 取固定值 (120 万元)。当 N_{year} 确定时, M 只与 M_{BESS} 和 M_{EC} 有关, 即与 VRB 和 EC 的配置有关, 下面详细分析几者之间的关系。

根据 VRB 和 EC 的自身特性, 本文中 M_{BESS} 和 M_{EC} 的计算方法如下:

$$M_{BESS} = \sum_{i=1}^{N_{BESS,u}} C_{BESS,p} P_{BESS,N-u} \gamma_{BESS,i} + C_{BESS,e} E_{BESS,N} \quad (12)$$

$$M_{EC} = \sum_{i=1}^{N_{EC,u}} (C_{EC,p} P_{EC,N-u} + C_{EC,e} E_{EC,N-u}) \gamma_{EC,i} \quad (13)$$

其中, $N_{BESS,u}$ 和 $N_{EC,u}$ 分别为 VRB 和 EC 控制单元数目; $C_{BESS,p}$ 和 $C_{EC,p}$ 分别为 VRB 和 EC 单位功率的投资成本 (元/kW); $C_{BESS,e}$ 和 $C_{EC,e}$ 分别为 VRB 和 EC 单位容量的投资成本 (元/(kW·h)); $P_{BESS,N-u}$ 和 $P_{EC,N-u}$ 分别为 VRB 和 EC 单元的额定功率 (kW/个); $E_{BESS,N}$ 为 VRB 总额定容量 (kW·h); $E_{EC,N-u}$ 为 EC 单元的额定容量 (kW·h/个); $\gamma_{BESS,i}$ 和 $\gamma_{EC,i}$ 分别为 VRB 和 EC 第 i 个控制单元的更换系数。

$$\gamma_{BESS,i} = \max \{ n_{BESS,i} / n_{BESS,max}, 1 \} \quad (14)$$

$$\gamma_{EC,i} = \max \{ n_{EC,i} / n_{EC,max}, 1 \} \quad (15)$$

其中, $n_{BESS,i}$ 和 $n_{EC,i}$ 分别为第 i 个 VRB 和 EC 控制单元的充放电次数; $n_{BESS,max}$ 和 $n_{EC,max}$ 分别为 VRB 和 EC 的最大循环次数。

由以上所述成本计算方法可知, 若 VRB 和 EC 价格固定, 则 M 与其配置及更换系数有关, 几者之间关系如图 4 所示, 选定 $N_{EC,u}$ 后根据第 2 节所述控制策略可得储能电站仿真运行一段时间后的仿真数据, 即 $P_{BESS}(t)$ 、 $E_{BESS}(t)$ 、 $E_{EC}(t)$ 和 2 种储能介质的更换系数, 进一步有:

$$N_{BESS,u} = \max \left\{ \bigcup_{t=0}^T P_{BESS}(t) \right\} / P_{BESS,N-u} \quad (16)$$

$$E_{BESS,N} = \max \left\{ \bigcup_{t=0}^T E_{BESS}(t) \right\} - \min \left\{ \bigcup_{t=0}^T E_{BESS}(t) \right\} \quad (17)$$

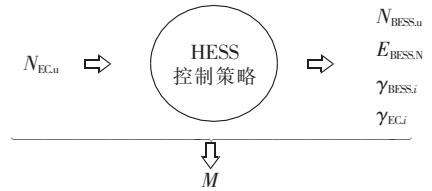


图 4 HESS 成本计算方法

Fig.4 Calculation method of HESS cost

将选定的 $N_{EC,u}$ 和根据储能电站仿真运行分析所得的 $N_{BESS,u}$ 、 $\gamma_{BESS,i}$ 和 $\gamma_{EC,i}$ 代入式 (11)~(13) 可得 M , 若摄动 $N_{EC,u}$ 则可得多组 M , 选取最小成本下的 HESS 配置作为其优化结果。

4 仿真分析

基于东北地区某装机 49.3 MW 风电场 30 d 的运行数据, 研究 HESS 的优化配置结果及 HESS 的工作性能, VRB 和 EC 的技术经济参数见表 1^[11,20]。

表 1 VRB 和 EC 技术经济参数
Tab.1 Technical and economic parameters
of VRB and EC

储能 介质	$P_{s,N-u}/\text{kW}$	$C_{s,p}/$ $(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	$C_{s,e}/$ $[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	$n_{s,\max}$	$\eta_{s,C}$	$\eta_{s,D}$
VRB	100	3 580	2 800	1.8×10^4	0.80	0.80
EC	50	1 090	7 450	2.0×10^5	0.95	0.95

注:下标 s 代表 BESS、EC。

4.1 HESS 优化配置研究

以 $\varepsilon(t)=0\text{ MW}$ 作为 HESS 工作的技术指标,研究 HESS 成本与 $N_{\text{EC},u}$ 之间的关系,分析结果如图 5 所示,图中 $M_{\min}$ 和 $N_{\text{EC},u-b}$ 分别为 HESS 最小成本及 EC 的最优配置数量。

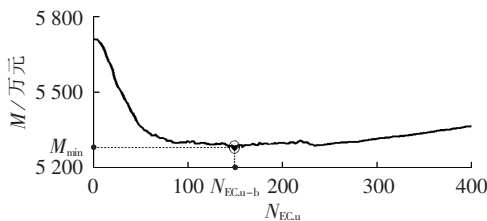


图 5 M 与 $N_{\text{EC},u}$ 之间关系曲线
Fig.5 M - $N_{\text{EC},u}$ curve

由图 5 可知,随着 $N_{\text{EC},u}$ 由 0 增加到 400, M 先下降后上升, $N_{\text{EC},u}=150$ 时, M 达到最小值 5 284 万元。分析其原因可知,增加 $N_{\text{EC},u}$ 时,EC 代替 VRB 承担更多的充放电任务,可降低 VRB 充放电次数,但却增加了 EC 的配置数量,而两者对 M 的影响作用相反。当 $N_{\text{EC},u}$ 从 0 增至 150 时,VRB 充放电次数的降低对 M 的影响更为明显,因此 M 逐渐降低;当 $N_{\text{EC},u}$ 从 150 增至 400 时,EC 自身成本的增加对 M 的影响更为明显,因此 M 逐渐上升。

分别以 $\varepsilon(t)$ 取值为 1 MW、2 MW、3 MW、4 MW、5 MW 作为 HESS 工作的技术指标,研究相应最优的 HESS 配置,结果如表 2 所示。

表 2 HESS 优化配置结果
Tab.2 Optimized HESS configuration

$\varepsilon(t)/\text{MW}$	$N_{\text{EC},u-b}$	$M_{\min}/\text{万元}$
1	70	4 783
2	112	4 215
3	84	3 620
4	65	3 102
5	46	2 666

由表 2 可知,随着对风电控制要求的降低,HESS 承担的充放电任务逐渐减轻,表现为 $M_{\min}$ 由 4 783 万元减小到 2 666 万元;表中所给 EC 最优配置数量可为 HESS 在工程应用中最优配置的选择提供参考。

4.2 HESS 控制策略有效性验证

基于 4.1 节所得优化配置结果,分析 VRB 和 EC 的运行情况以验证所提 HESS 控制策略的有效性。

以 $\varepsilon(t)=0\text{ MW}$ 作为 HESS 工作的技术指标, $N_{\text{EC},u-b}=150$,VRB 和 EC 日充电功率曲线如图 6 所示。由图 6 可知,EC 负责平抑 0 值附近频繁波动的功率分量,VRB 承担其他时段的平抑任务,充放电次数显著降低;图中 P_{EC} 并未达到 EC 的额定功率 ($N_{\text{EC},u-b}P_{\text{EC},N-u}$),是由于 EC 容量密度较低、存在容量约束所导致。

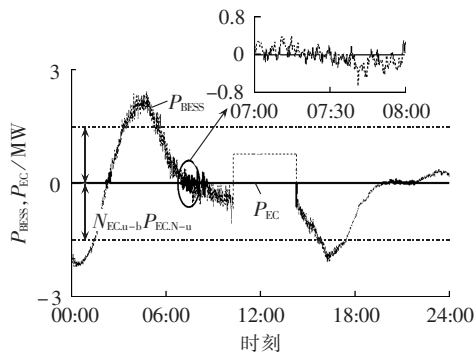


图 6 VRB 和 EC 充电功率波形
Fig.6 Waveforms of VRB and EC charging power

分别以 $\varepsilon(t)$ 取值为 0 MW、3 MW 和 5 MW 作为 HESS 工作的技术指标,根据 4.1 节所得 $N_{\text{EC},u-b}$,统计各 VRB 单元在 30 d 内的充放电次数,结果如图 7 所示, $n_{\text{BESS},i}$ 为第 i 个 VRB 单元的充放电次数。由图可知,随着技术指标的降低,VRB 单元最大充放电次数由 754 次减少到 453 次,说明 VRB 承担的充放电任务逐渐减轻,与实际情况相符;在不同技术指标下各电池单元充放电次数相差不大,分别在 0~81 次、0~69 次和 0~63 次变化(见表 3),说明所设计控制策略合理分配了 VRB 单元的充放电任务。

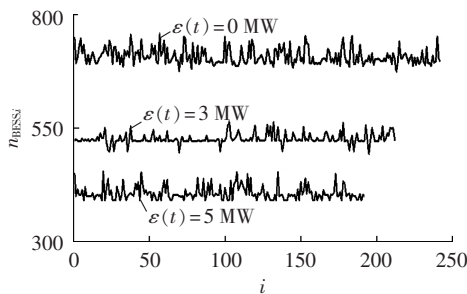


图 7 VRB 各单元充放电次数统计
Fig.7 Statistics of charging/discharging times
of VRB cells

表 3 统计分析
Tab.3 Statistical analysis

$\varepsilon(t)/\text{MW}$	$\max\{n_{\text{BESS},i}\}$	$\min\{n_{\text{BESS},i}\}$	$\max\{n_{\text{BESS},i}\}-\min\{n_{\text{BESS},i}\}$
0	754	673	81
3	562	493	69
5	453	390	63

5 结论

a. 提出了一种适用于 VRB-EC 混合储能系统

的控制策略,通过设置 EC 的动作区间,使 EC 代替 VRB 负责平抑数值较小且频繁波动的功率分量,有效降低了 VRB 的充放电次数,通过排序法合理分配了 VRB 单元的充放电任务,有效避免了 VRB 不必要的损耗,对工程应用中 VRB-EC 混合储能系统运行方式的制定具有理论指导作用。

b. 基于所设计控制策略研究了 EC 配置数量对 HESS 成本的影响,仿真分析了在达到不同风电预测精度要求下的 HESS 最优配置结果及最小成本,可为工程应用中 VRB-EC 混合储能系统配置的选择提供参考依据。

参考文献:

- [1] 孔飞飞,晁凯,袁铁江,等. 用于短期电网调度的风电场储能容量估算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):21-24.
KONG Feifei,CHAO Qin,YUAN Tiejiang,et al. Estimation of wind farm energy storage capacity for short-term power dispatch [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):21-24.
- [2] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying,YE Tinglu,XIN Yaozhong,et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):1-9.
- [3] 孙惠娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):123-128.
SUN Huijuan,PENG Chunhua,YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):123-128.
- [4] DONG Zhaoyang,WONG K P,MENG Ke,et al. Wind power impact on system operations and planning[C]//Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,IL,USA:[s.n.],2010:1-5.
- [5] TANABE T,SATO T,TANIKAWA R,et al. Generation scheduling for wind power generation by storage battery system and meteorological forecast[C]//Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh,USA:[s.n.],2008:1-7.
- [6] 李军徽,朱昱,严干贵,等. 储能系统控制策略及主电路参数设计的研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(7):7-12.
LI Junhui,ZHU Yu,YAN Gangui,et al. Research on the control strategy and the design of main circuit parameters of energy storage system[J]. Power System Protection and Control,2012,40(7):7-12.
- [7] 王菊芬,李宣富,杨海平,等. 光伏发电系统中影响蓄电池寿命因素分析[J]. 蓄电池,2002(2):51-54.
WANG Jufen,LI Xuanfu,YANG Haiping,et al. Analysis of factors influencing the lifetime of lead-acid battery in photovoltaic system[J]. Chinese Labat Man,2002(2):51-54.
- [8] SMITH T A,MARS J P,TURNER G A. Using supercapacitors to improve battery performance[C]//Power Electronics Specialists Conference. Cairns,Australia:[s.n.],2002:124-128.
- [9] SPYKER R L,NELMS R M. Optimization of double-layer capacitor arrays[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2000,36(1):194-198.
- [10] 王振浩,刘金龙,李国庆. 基于超级电容器储能的并网风电场功率与电压调节技术[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):113-116.
WANG Zhenhao,LIU Jinlong,LI Guoqing. Power and voltage regulation of wind farm based on EDLC energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(3):113-116.
- [11] ZHANG Xueqing,WEI Yi,XU Shenchu,et al. Optimization design of all vanadium redox flow battery energy storage system[C]//Electricity Distribution(CICED). Nanjing,China:[s.n.],2010:1-4.
- [12] 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.
- [13] ZHOU Tao,FRANCOIS B. Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(1),95-104.
- [14] LEE H,SHIN B Y,HAN S,et al. Compensation for the power fluctuation of the large scale wind farm using hybrid energy storage applications [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2012,22(3):5701904.
- [15] 施啸寒,王少荣. 蓄电池-超导磁体储能系统平抑间歇性电源出力波动的研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):53-58.
SHI Xiaohan,WANG Shaorong. Power output fluctuation suppression by hybrid energy storage system for intermittent source[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):53-58.
- [16] 谢石骁,杨莉,李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术,2012,36(5):79-84.
XIE Shixiao,YANG Li,LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system [J]. Power System Technology,2012,36(5):79-84.
- [17] 张坤,毛承雄,谢俊文,等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):79-87.
ZHANG Kun,MAO Chengxiong,XIE Junwen,et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farms [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):79-87.
- [18] 李军徽. 抑制风电对电网影响的储能系统优化配置及控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
LI Junhui. Research on the optimal plan and control of energy storage system to reduce the effect of wind power on the grid [D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.
- [19] 南晓强,李群湛. 考虑风功率预测误差分布的储能功率与容量配置法[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):117-122.
NAN Xiaoqiang,LI Qunzhan. Energy storage power and capacity allocation based on wind power forecasting error distribution[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):117-122.
- [20] CHACRA F A,BASTARD P,FLEURY G,et al. Energy storage associated to wind farms in a two-tariff structure bidding tender[C]//IEEE Russia Power Tech. Petersburg,USA:IEEE,2005:1-5.

作者简介:



李军徽

李军徽(1976-),男,陕西宝鸡人,副教授,博士,主要从事新能源发电运行与控制、大规模储能技术应用方面的研究(E-mail: nedu.ljh@gmail.com);

朱星旭(1989-),男,吉林德惠人,硕士研究生,主要从事储能技术应用方面的研究(E-mail: neduzhuxingxu@163.com)。

(下转第78页 continued on page 78)

phase shunt reactor currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 74-78.

[14] 石光, 邵文权, 郭耀珠, 等. 带并联电抗器输电线路单相故障识别判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 53-58.

SHI Guang, SHAO Wenquan, GUO Yaozhu, et al. Identification criterion of permanent single-phase fault for transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 53-58.

[15] 刘浩芳, 王增平, 刘俊岭. 带并补的超高压输电线路单相自适应重合闸新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 62-66.

LIU Haofang, WANG Zengping, LIU Junling. A new criterion for single-phase adaptive reclosure of shunt reactor compensated EHV transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 62-66.

作者简介:



邵文权

邵文权(1978-), 男, 湖北竹山人, 副教授, 博士, 主要研究方向为输电线路继电保护及自适应重合闸 (**E-mail**: swq0426@126.com);

南树功(1990-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护及其自动化装置方面的研究工作 (**E-mail**: nanshugong@126.com);

章霄微(1987-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士, 主要从事电力系统继电保护相关工作;

李彦斌(1975-), 男, 陕西西安人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护教学及科研工作。

Beat-frequency characteristics for single-phase transient fault of EHV/UHV transmission line with shunt reactor

SHAO Wenquan, NAN Shugong, ZHANG Xiaowei, LI Yanbin

(Department of Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: The beat-frequency phenomena may occur after the single-phase transient fault of transmission line with shunt reactor is disappeared, the mechanism and conditions of which are deeply analyzed. The frequency and attenuation characteristics of low-frequency free oscillation component of transient fault and the conditions, under which no obvious beat-frequency phenomena will occur after the faulty phase are de-energized, are discussed. Results show that, the obvious beat-frequency phenomena will occur in faulty electrical variables only when the fault is transient and the arc is reliably extinguished. For some transient faults, if the difference between elementary- and low-frequency components is too big in amplitude and too small in frequency, or the low-frequency free oscillation component is quickly attenuated, no beat-frequency phenomena will occur in the voltage of tripped phase and the current of reactor, where the fault type can be identified by non-beat-frequency criteria. Simulative results of ATP and physical experiment model verify the correctness of theoretical analysis.

Key words: adaptive reclosure; shunt reactor; transient fault; beat-frequency; UHV power transmission; EHV power transmission

(上接第71页 continued from page 71)

Optimal configuration and control of modular VRB-EC hybrid energy storage system

LI Junhui¹, ZHU Xingxu¹, YAN Gangui¹, MU Gang¹, WANG Zhiming², LUO Weihua²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Liaoning Province Electric Power Company of State Grid, Shenyang 110000, China)

Abstract: A control strategy for the HESS (Hybrid Energy Storage System) composed of all-VRB (Vanadium Redox flow Battery) and EC (Electrochemical Capacitor) is proposed, and the optimal quantity of configured ECs and the minimum cost of HESS are analyzed. The total charge/discharge power of HESS is designed based on the wind power forecast data, the EC action interval is set to reduce the loss of VRB, and the sorting method is applied to reasonably distribute the charging task for each VRB cell. According to the measured and forecasted data of a wind farm for 30 days, the influence of configured EC quantity on the HESS cost is simulated and analyzed, and the optimal quantity of configured ECs and the minimum cost of HESS are obtained, which can be referred during the engineering of VRB-EC HESS project for its operation mode design and EC configuration.

Key words: wind power; forecasting; energy storage; vanadium redox flow battery; electrochemical capacitor; group control; optimization