

基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究

于芃¹, 赵瑜¹, 周玮¹, 孙辉¹, 全程浩², 刘剑², 宋颖巍², 刘岩²

(1.大连理工大学电气工程学院, 辽宁大连116024; 2.辽宁省电力公司技术经济研究中心, 辽宁沈阳110006)

摘要: 为提高风电功率的可控性, 依据国家电网公司关于风电场并网的技术规定, 提出了一种基于新型混合储能系统平抑风电波动功率的方法。在对风电波动功率进行分解, 并研究其平抑过程对储能系统性能需求的基础上, 研制了一种新型混合储能系统。通过对运行控制方式的设计, 使得该储能系统能够与风电系统进行精确、高效的功率交换; 同时, 储能元件可根据各自的储能特性平抑不同类型的波动功率。仿真分析表明, 该平抑方法使得储能元件的储能优势得到了充分发挥, 能够延长系统的使用寿命, 平抑后的风电输出功率可以满足电力系统实时调度的要求。

引言

受气象条件, 地理环境等一系列因素的影响, 风力发电输出功率具有较强的波动性和间歇性。随着风力发电的输出电能在电力系统中所占比重的增加, 其输出功率的波动性给电网运行带来的不利影响日趋严重^[1-3]。

针对
风电输出
功率的波动, 最直
接的调节方式是采用调节桨距角或者
改变转速的方式来对风机输出功率进行调节^[4-5]

, 但此
方式会影
响风能的利用效率
。美国、丹麦等国家采用水电与风电
联合调度的方法补偿风电场输出功率的波动^[6]
。我国西北、东北等风资
源、煤炭资源都十分丰富的地区, 采用了“风火打
捆外送”的方法^[7], 风电场输出的波动功率经火电调节稳定后向我国的东南沿海地区等重负荷中心输送。

除此之外, 电力存储技术是一种新兴的实时调节风电场输出功率的方法, 此类方法控制灵活, 使用方便, 能够有效地增强含有并
网风电场的电力系统的安全
稳定性。日本在NEDO公司的支持下建成了钠硫电池储
能系统^[8]

, 用于平抑八丈岛的风力发电输出功率的波动, 取得了令人满意的效果。美国爱荷华州于2006年投资建设了一座268
MW的压缩空气储能电站, 用于对容量
为10MW的风电场的输出功率进行调节^[9]

。我国于2006年在内蒙古自治区开始投资兴建总装机容量为1200MW的抽水蓄能电站, 承担对当地风电场的削峰、填
谷、事故备用等任务^[10]。此外, 超级电容器储能^[11]、超导储能^[12]、飞轮储能^[13]
等储能方式也可用于对风电功率的调节, 但目前大多处于实验研究和示范工程阶段。

本文将具有随机性的风电波动功率分解为三类具有不同特性的波动功率, 结合由蓄电池和超级电容器构成的新型混合储能系统的特性, 提出一种基于混合储能系统的平抑风电波动功率的方法。该方法不仅可以实现储能系统与风电系统的精确功率交换, 平抑风电波动功率; 还可以使得储能元件发挥自身的储能特性, 平抑不同类型的波动功率, 进而延长储能系统的使用寿命, 降低运行成本。

1 风电波动功率的分解及平抑时对储能系统的性能需求分析

目前, 国内风电场的风机普遍运行于最大风能捕获模式, 输出功率随风速变化。由于风速具有很强的间歇性, 因此, 输出功率的波动很大。图1显示的是国内某风场850kW风机日输出功率曲线, 输出功率波动范围为: 0~850kW, 如

此大范围的功率波动会严重影响并网电力系统的稳定运行。

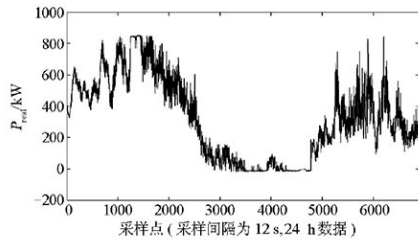


图1 某风场单台风机日输出功率曲线

Fig.1 Daily output power curve of single wind turbine generator in certain wind farm

依据我国于 2006 年颁布的国家电网公司风电场接入电力系统技术规定^[14], 要求装机容量小于 30 MW 的风电场每分钟有功功率波动应小于 6 MW(20%)。对于图 1 中的功率曲线, 进行如下处理: 将每分钟的功率平均值设为瞬时风电功率调度目标值 P_{standard} , 实时功率 P_{real} 与 P_{standard} 做差 $P_{\text{error}} = P_{\text{real}} - P_{\text{standard}}$, P_{error} 中超出 $20\%P_{\text{standard}}$ 的部分即为需要平抑的波动功率值, 如图 2 所示。

根据其波动特点, 可将图 2 中的波动功率分为三类:

1) 尖峰波动功率 P_{peak} (图中超出虚线之外的波动功率), 由风速瞬间大幅度增大或减少引起。

P_{peak} 幅值大, 但所占比重很小(持续时间较小), 能量波动较小。

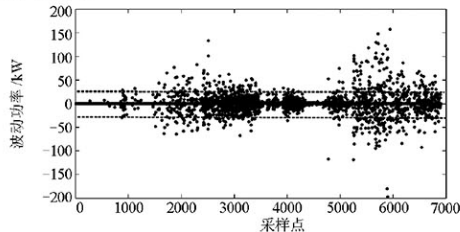


图2 波动功率曲线

Fig. 2 Fluctuating power curve

2) 稳态波动功率 P_{steady} (图中虚线之间部分), 由风速持续增大或减小引起。 P_{steady} 的幅度小, 但所占比重很大, 持续时间长, 能量波动很大。

3) 频繁往复性功率波动 P_{recy} (沿功率“零轴”短时内往复波动), 由风速快速往复变化引起。从波动趋势来看, P_{steady} 和 P_{peak} 中皆存在着频繁往复性的波动。

采用储能系统对上述三类波动功率进行平抑时, 需要储能系统兼具有频繁往复性充放电(用于平抑 P_{recy})、尖峰功率吞吐(用于平抑 P_{peak})、大容量能量吞吐(用于平抑 P_{steady})的能力。在对储能系统的投资、运行成本有明确约束时, 为平抑上述三类波动功率, 储能系统应具有以下特性:

- 1) 循环寿命长。
- 2) 大电流充放电能力强, 等效内阻低, 功率密度高。
- 3) 能量密度高。

2用于风电功率平抑的新型混合储能系统

2.1储能系统结构组成及工作原理

本文采用一种新型有源并联式混合储能系统(Active-Paralled Hybrid Energy Storage System, APHESS)对风电波动功率进行实时的平抑。该系统的结构如图3所示。

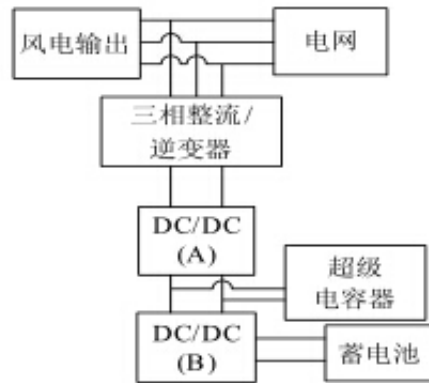


图 3 新型有源并联式混合储能系统(APHESS)结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of APHESS

APHESS将蓄电池和超级电容器进行了有机结合，以并联方式接于风电场的输出母线。当风电输出功率偏大时，APHESS吸收多余的功率；当风电输出功率偏小时，APHESS释能以补偿风电功率的缺额。通过与风电系统实时的功率交换，APHESS实现对风电波动功率“削峰填谷”的平抑。

APHESS中，作为充放电控制器的DC/DC(A)、DC/DC(B)采用双向斩波器结构，如图4所示。

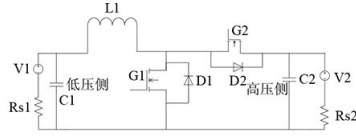


图4 充放电控制器结构

Fig.4 Structure of charge-discharge controller

蓄电池、超级电容器分别接于两个充放电控制器的低压侧。由于超级电容器的能量缓冲作用，可以实现对 DC/DC(A)、DC/DC(B)的解耦控制。DC/DC(A)控制储能系统的充放电总功率 P_{whole} ，使储能系统能够根据 P_{real} 偏离 $P_{standard}$ 的情况吸收或者发出相应功率，以实现风电波动功率的平抑。DC/DC(B)可独立精确控制蓄电池的充放电功率 P_{bat} 。

由 APHESS 的结构可知，超级电容器实时补偿 P_{bat} 与 P_{whole} 之间的差额。因此通过 DC/DC(B)对 P_{bat} 的精确控制，可以实现 P_{whole} 在蓄电池和超级电容器之间的灵活分配，有利于二者储能优势的发挥。

蓄电池剩余容量不足时，选择风电输出功率平稳的时间对蓄电池容量进行补充。DC/DC(B)可根据蓄电池的充电特性对其充电过程进行精确管理，以延长使用寿命。

2.2 APHESS 储能特性分析

APHESS 中，超级电容器具有功率密度大、循环寿命长、能量密度低的特点^[15]，用于平抑风电波动功率中的 P_{peak} 及 P_{recy} ，可有效减少 APHESS 中蓄电池的充放电响应频率，延长储能系统的循环使用寿命；蓄电池具有能量密度大、循环寿命低的特点^[16]，稳态波动功率 P_{steady} 的平抑将由其负责。

设 APHESS 中，蓄电池的储能容量为 $Energy_{bat}$ ，超级电容器的储能容量为 $Energy_{cap}$ 。因此，APHESS 的储能总容量为

$$Energy_{whole} = Energy_{bat} + Energy_{cap} \quad (1)$$

储能系统的能量密度、功率密度可以表示为

$$Per_E_{hyb} = \frac{Energy_{whole}}{\frac{Energy_{bat}}{Per_E_{bat}} + \frac{Energy_{cap}}{Per_E_{cap}}} \quad (2)$$

$$Per_P_{hyb} = \frac{P_{peak}}{\frac{P_{peak}}{Per_P_{cap}} + \frac{P_{steady}}{Per_P_{bat}}} \quad (3)$$

其中： Per_E_{bat} 、 Per_E_{cap} 分别表示蓄电池、超级电容器的能量密度； Per_P_{bat} 、 Per_P_{cap} 分别表示二者的功率密度。

由超级电容器和蓄电池储能特性可知

$$Per_E_{bat} \gg Per_E_{cap} \quad (4)$$

$$Per_P_{cap} \gg Per_P_{bat} \quad (5)$$

由风电功率波动特点及蓄电池、超级电容器所承担的平抑任务可知

$$P_{peak} \gg P_{steady} \quad (6)$$

$$Energy_{bat} \gg Energy_{cap} \quad (7)$$

因此，式(2)与式(3)可简化为

$$Per_E_{cap} \ll Per_E_{hyb} < Per_E_{bat} \quad (8)$$

$$Per_P_{bat} \ll Per_P_{hyb} < Per_P_{cap} \quad (9)$$

综上所述，APHESS 兼具有高功率密度、高能量密度、高循环寿命的特点，能够满足平抑风电波动功率对储能系统的储能特性需求。

3APHESS平抑风电波动功率的运行方式分析

APHESS的运行控制框图如图5所示，通过对APHESS吞吐总功率的精确控制及其内部功率的合理分配，既能够有效平抑风电波动功率，还使得超级电容器、蓄电池能够根据各自的储能优势承担不同类型风电波动功率平抑的任务。

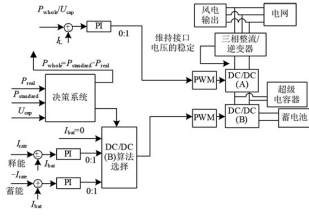


图 5 APHESS 的控制框图

Fig. 5 Control block of APHESS

3.1 APHESS 总吞吐功率的控制

根据平抑目标 P_{standard} 及实时输出功率 P_{real} , 可确定 APHESS 吞吐的总功率 P_{whole} 的大小及方向。APHESS 中, P_{whole} 由 DC/DC(A) 来控制。当 P_{real} 小于 P_{standard} 时, DC/DC(A) 控制 APHESS 释能, 释能功率为

$$|P_{\text{whole}}| = P_{\text{standard}} - P_{\text{real}} \quad (10)$$

当风电输出功率较大时, DC/DC(A) 控制 APHESS 蓄能, 蓄能功率为

$$|P_{\text{whole}}| = P_{\text{real}} - P_{\text{standard}} \quad (11)$$

精确控制 P_{whole} 的实现方法为: 实时测量超级电容器的端电压 U_{cap} (DC/DC(A) 的低压侧电压由其决定), 则 DC/DC(A) 中电感电流的控制目标为

$$I_L = \frac{P_{\text{whole}}}{U_{\text{cap}}} \quad (12)$$

通过对 I_L 的闭环控制, 可精确控制 P_{whole} 的大小及方向, 以实现风电功率的平抑。

DC/DC(A) 的高压侧为储能系统的输出接口, 三相整流/逆变器控制该接口电压的稳定, 以利于能量、功率在 APHESS 与风电系统间的高效传输。

3.2 APHESS 内部的功率分配及实现

在 3.1 节的基础上, 根据风电波动功率的不同类型, 将 P_{whole} 在蓄电池和超级电容器之间进行分配。

(1) 平抑 P_{recy} 和 P_{peak} 时 APHESS 内部的功率分配及实现

平抑 P_{recy} 及 P_{peak} 需要储能系统进行频繁往复性充放电及大功率充放电。为此, 超级电容器独自承担对 P_{recy} 和 P_{peak} 的平抑, 以充分发挥其储能优势。此时 APHESS 内部的功率分配关系为

$$P_{\text{cap}} = P_{\text{whole}} \quad (13)$$

$$P_{\text{bat}} = 0 \quad (14)$$

为实现该功率分配, 约定在 APHESS 运行时超级电容器遵循优先充放电的原则, 该运行方式具体实现如下:

设超级电容器最优工作范围为 $[U_{\text{opt_down}}, U_{\text{opt_up}}]$ 。超级电容器端电压 U_{cap} 处于最优工作范围内时, DC/DC(B) 控制蓄电池停止工作 ($I_{\text{bat}} = 0$), APHESS 与风电系统进行的所有功率交换都由超级电容器独自承担。平抑 P_{recy} 及 P_{peak} 所需的能量吞吐较少, U_{cap} 变化较小, 因而超级电容器能够通过优先充放电实现对 P_{recy} 及 P_{peak} 的平抑。超级电容器对这两类功率的平抑, 能有效减少蓄电池的充放电响应频率, 防止其进行超倍率充放电, 从而延长其使用寿命, 降低储能系统运行成本。

(2) 平抑 P_{steady} 时 APHESS 内部的功率分配及实现

平抑 P_{steady} 需要储能系统进行大量的能量吞吐。超级电容器在优先充放电的过程中, 遇到 P_{steady} 往往会导致其端电压偏离最优工作范围 (超级电容器的能量密度较低)。此时, APHESS 中的蓄电池进行额定电流下的蓄能、释能, 以实时调节超级电容器的荷电状态, 保证超级电容器能够应对随时可能发生的 P_{recy} 和 P_{peak} 。因此, 蓄电池成为平抑 P_{steady} 的最终能量来源, 充分发挥了其能量密度大的优点。

蓄电池参与对超级电容器的荷电状态调整时, APHESS 内部的功率分配关系为: 当 APHESS 与蓄电池的蓄能、释能状态一致时

$$P_{\text{bat}} = P_{\text{whole}} + P_{\text{cap}} \quad (15)$$

当二者相反时

$$P_{\text{cap}} = P_{\text{whole}} + P_{\text{bat}} \quad (16)$$

该运行方式的实现方法如下: 设蓄电池对超级电容器进行荷电状态调节的调整点为

$$U_{\text{cap}} = U_{\text{opt}} \quad (17)$$

当 U_{cap} 降至 $U_{\text{cap}} \leq U_{\text{opt_down}}$ 时, DC/DC(B) 控制蓄电池以额定电流 I_{rate} 放电, 对超级电容器进行能量补充, 直至 $U_{\text{cap}} = U_{\text{opt}}$, 然后退出运行 ($I_{\text{bat}} = 0$); 当 U_{cap} 升至 $U_{\text{cap}} \geq U_{\text{opt_up}}$ 时, DC/DC(B) 控制蓄电池以额定电流 I_{rate} 充电, 以吸收超级电容器中多余的能量, 直至 $U_{\text{cap}} = U_{\text{opt}}$, 然后退出运行。

4 APHESS平抑风电波动功率仿真

在Matlab/Simulink环境下，按图3所示结构搭建仿真系统。约定APHESS能量流动方向的正方向为释能方向。

仿真参数: 蓄电池容量 960 AH, 额定充放电电流为 288 A, 电压 300 V; 超级电容器组容量为 40 F, 耐压 800 V, 初始电压 460 V, 最佳工作范围为 [450 V 775 V], 荷电状态调整点为 $U_{opt} = 510$ V; 电网相电压 690 V。三相整流/逆变器负责控制 APHESS 接口电压 $U_{dc} = 1200$ V 恒定。

实时风电功率取自图 1 中某 15 min 的数据, 波动范围为 118~643 kW, 如图 6(a)所示。为了保持风电输出功率能够平稳跟随实时调度计划目标值, 利用本文提出的方法对风电功率进行平抑, 平抑目标值为 316 kW。

(1) 平抑风电波动功率的有效性分析

APHESS 的实时吞吐的总功率如图 6(b)所示。由图 6 可见, 当风电功率大于目标值时, APHESS 从风电系统中吸收多余功率并进行存储; 反之, APHESS 放电补偿风电输出功率的不足。

风电波动功率的平抑效果如图 7 所示。APHESS 经过与风电系统的精确、高效的功率、能量交换, 风电输出功率基本稳定于 316 kW, 波动约 6%, 符合我国颁布的风电场接入电力系统技术规定中关于 20% 的要求, 能够实现风电输出功率实时跟踪调度计划目标值。

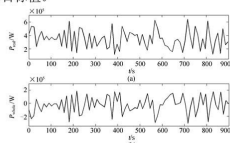


图 6 波动功率平抑仿真曲线

Fig. 6 Simulation curve of balancing fluctuant power

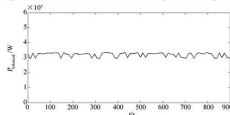


图 7 平抑后的风电功率曲线

Fig. 7 The curve of balanced wind power

(2) 平抑风电波动功率时, APHESS 内部的功率分配分析

图 8(a)表示上述平抑过程中超级电容器端电压 U_{cap} , 图 8(b)表示蓄电池充放电电流 I_{bat} 。

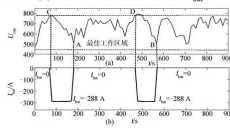


图 8 APHESS 运行曲线(15 min)

Fig. 8 Operation curve of APHESS(15 min)

当 U_{cap} 处于最优工作范围内时(图中横向虚线所包含的区域), 超级电容器独自承担所有的功率吞吐 $P_{cap} = P_{whole}$, 蓄电池的充放电电流为零 $I_{bat} = 0$, 充分发挥了超级电容器功率密度大、循环寿命长的优点。由图 8 可见, 平抑过程中, 蓄电池充放电响应时间约为 3 min, 仅占总时间的 20%。充放电响应频率的明显下降, 可有效延长蓄电池使用寿命。

该仿真中的风电波动功率绝大部分都是正向波动, 需要 APHESS 吸收大量能量。因此, 再次出现 U_{cap} 高于最优工作范围上限的现象(图 8 中 C、D 点)。此时 DC/DC(B) 的控制蓄电池以额定电流 $I_{bat} = -288$ A 充电, 吸收超级电容器的多余能量, 直至荷电状态调整点(图 8 中 A、B 点)。由此实现了蓄电池对长期稳态波动功率 P_{steady} 的平抑, 使其能量密度大的优势得到了发挥。由图 8 中纵向虚线所划出的区域可见, 由于蓄电池吸收能量, 致使 U_{cap} 迅速下降。

图 9 显示了 U_{cap} 第二次越出最优工作范围至 U_{cap} 被调整到荷电状态调整点这一过程中(图 8(a)中的 D-B 段)蓄电池、APHESS 的充放电功率(如图 9(a)所示)及超级电容器的实时端电压(如图 9(b)所示)。

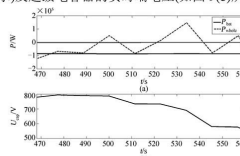


图 9 APHESS 运行曲线(图 8 中 D-B 段)

Fig.9 Operation curve of APHESS (the section D-B in Fig. 8)

现以该过程为例, 分析蓄电池对超级电容器进行荷电状态调节时, APHESS 内部的功率分配关系。蓄电池以额定电流充电时, 端电压变化很小, 充电功率基本保持 $P_{bat} = -86400$ W 恒定。当蓄电池与 APHESS 都工作于储能状态时($P_{bat} < 0$, $P_{whole} < 0$), 由式(15), APHESS 内部功率关系为 $P_{bat} = P_{whole} + P_{cap}$ 。其中, 当 $|P_{whole}| < |P_{bat}|$, 超级电容器以功率 $P_{cap} = |P_{bat}| - |P_{whole}|$ 释能, 导致 U_{cap} 下降; 当 $|P_{whole}| > |P_{bat}|$, 超级电容器以功率 $P_{cap} = |P_{whole}| - |P_{bat}|$ 吸收能量, U_{cap} 上升(如图 9 中 463~475 s 所示)。当蓄电池与 APHESS 工作状态相反时($P_{bat} < 0$, $P_{whole} > 0$), 由式(16), 超级电容器以功率 $P_{cap} = |P_{bat}| + |P_{whole}|$ 释放能量, U_{cap} 下降。

5结论

本文基于新型混合储能系统APHESS, 提出了一种风电波动功率的平抑方法。通过精确的功率控制和合理的功率分配, APHESS不仅能够与风电系统进行精确、高效的功率交换, 实现对风电波动功率“削峰填谷”的平抑; 还能针对随机风电波动功率分解后的特性使得蓄电池、超级电容器承担不同类型波动功率平抑的任务, 充分发挥了二者的储能优势, 延长了系统的使用寿命, 能够降低运行成本。仿真结果表明, APHESS可以有效平抑功率波动, 从而能够降低风功率波动给电力系统运行带来的影响, 增强风电场的功率控制能力, 有利于提高电力系统对风电的接纳能力。

参考文献

- [1]田春笋, 李琼林, 宋晓凯.风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J].电力系统保护与控制, 2009,37(19): 46-50.
- [2]吴昊, 张焰, 刘波.考虑风电场影响的发输电系统可靠性评估[J].电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 36-41.
- [3]Luo Changlin, Ooi Boon-Teck.Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3):708-716.
- [4]de Battista H, Mantz R J.Dynamical variable structure controller for power regulation of wind energy conversion systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(4): 756-763.
- [5]Senjyu T, Sakamoto R, Urasaki N, et al.Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control[J].IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(2): 467-475.
- [6]Brooks D, Key T, Felton L. Increasing the value of wind generation through integration with hydroelectric generation[C]// Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2005: 1-3.
- [7]肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 等.甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J].中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-6.
- [8]温兆银.钠硫电池及其储能应用[J].上海节能, 2007(2):7-10.
- [9]Daneshi H, Srivastava A K, Daneshi A.Generation scheduling with integration of wind power and compressed air energy storage[C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition, LA, United States, 2010: 1-6.
- [10]王云涛, 何江.抽水蓄能建设新思路: 与风电联合开发—内蒙古呼和浩特抽水蓄能电站建设实践[J].中国三峡, 2010, 11: 32-35.
- [11]Chad Abbey, Geza Joos.Supercapacitor energy storage for wind energy application[J].IEEE Transactions on Industry Application, 2007, 43(3): 769-775.
- [12]张占奎, 王德意, 迟永宁, 等.超导储能装置提高风电场暂态稳定性的研究[J].电力系统保护与控制, 2010,38(24): 38-42.
- [13]Cimuca G, Breban S, Radulescu M M, et al. Design and control strategies of an induction- machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator[J].IEEE Transactions on Energy Conversion,2010, 25(2): 526-533.
- [14]中国电力科学研究院.GB/Z 19963-2005, 风电场接入电力系统技术规定[S].北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15]Conway B E.Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications[M].New York, Plenum, 1999.
- [16]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.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/93409.html>