

基于PCS模型的超级电容器蓄电池混合储能研究

混合储能系统 (HESS) 将能量型储能和功率型储能结合, 充分利用不同储能设备的特性取长补短, 可以适应微电网各种场合的需求。建立了混合储能系统的数学模型, 提出了一种基于能量转换 (PCS) 模型的超级电容器蓄电池混合储能系统。采用蓄电池与超级电容分别经过双向DC-DC变换器接入直流母线并联, 再经统一采用PQ控制算法的DC-AC功率变换器接入交流电网的接入方式, 该结构可减少DC-AC变换器的数目。最后进行了仿真研究, 仿真结果表明: 该储能系统一方面满足超级电容在短时间大功率吞吐过程中的组串电压范围要求; 另一方面可维持直流母线电压恒定, 减小锂电池在充放电过程中的电流纹波, 控制灵活性高, 具有所需超级电容和电池电压等级较低、利用率高的优点。

曾 伟¹ 周细文² 孙 旻¹ 徐在德¹ / 1. 国网江西省电力科学研究院 2. 江苏同芯电气科技有限公司

0 引言

近年来, 我国大力发展清洁的可再生能源电源, 其装机容量在电力系统中的比例不断上升。由于可再生能源电源输出功率随着天气的变化而变化, 不能制订出准确的发电计划, 因此大规模可再生能源并网会影响电力系统运行的可靠性和稳定性^[1-2]。

现有的储能介质可以分为能量型和功率型两类^[3-4]。以锂电池、钠硫电池、液流电池和铅酸电池等为代表的能量型储能介质可以很好地解决新能源发电的波动性问题并参与削峰填谷, 但响应速度慢、循环寿命短, 限制其在高频功率波动场合的应用^[3-4]; 以超级电容、超导

国家科技部中小企业发展专项资金中欧国际合作项目 (2014571)。

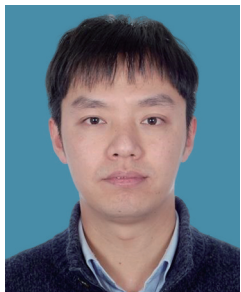
磁储能和飞轮储能等为代表的功率型储能介质具有响应速度快、瞬时输出功率极大以及循环充放电次数高的优点, 但可持续放电时间短, 且有容量限制^[5-8]。为使储能电站同时具有大容量和大功率性能, 本文将能量型储能介质和功率型储能介质组成混合储能系统 (Hybrid Energy Storage System, HESS), 充分利用不同储能设备的特性取长补短, 可以适应微电网各种场合的需求。

本文首先对混合储能系统的结构、功能进行介绍, 对其中蓄电池和超级电容两种典型储能建立等效电路模型, 提出了一种基于PCS模型的超级电容器蓄电池混合储能系统, 详细介绍了混合储能PCS系统的双向DC-DC变换器与DC-AC变换器控制策略, 利用PACAD/EMTDC软件搭建了仿真模型, 并进行了仿真验证。

1 等效电路模型

1.1 HESS结构

HESS系统基本电路拓扑结构如图1所示。其中, 等效电路模块包括蓄电池和超级电容分别通过并串联构成的电池堆和超级电容阵列; PCS模块是储能实现与电网能量交换的核心设备: DC-DC变换器主要用来实现储能的充放电控制, 将较低的储能单体电压变换到较高的直流电压, 以达到逆变的要求; DC-AC变换器是直流的储能系统与交流电网之间的连接桥梁, 保证两者间的功率



曾 伟/高级工程师

关键词/Keywords

混合储能系统 ·
能量转换模型 ·
微电网 ·
超级电容 ·
蓄电池 ·

能够双向流动；此外，HESS中两种储能设备之间的功率分配也是由PCS模块完成的。

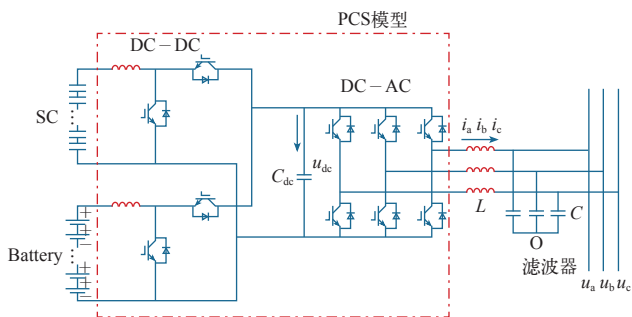


图1 HESS基本电路拓扑

1.2 超级电容通用模型

超级电容（Super-Capacitor，SC）是近年来研究比较成熟的新型储能，按照其储能原理可分为双电层电容器与法拉利地准电容器两种，本文选取目前产品化程度较高的双电层电容器作为研究对象。双电层电容器的原理如图2所示，它利用高比表面积的电极为与有机电解液界面上的电荷物理迁移产生的双电层电容来存储电能。由于超级电容电动机与电解液比面积极大，而双电荷层间距极小，且储能工作不基于电化学反应，故超级电容具有效率高、功率密度大以及可循环充放电次数多的优点。

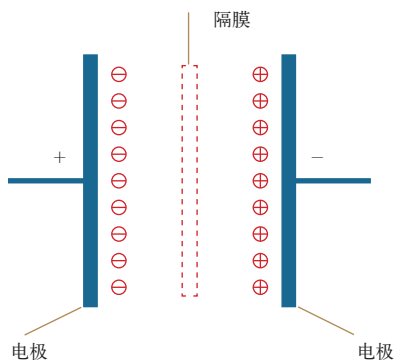


图2 超级电容器原理结构

SC的理想储能表达式为

$$W_e = \frac{1}{2} C_F U_F^2 \quad (1)$$

$$C_F = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (2)$$

式中， W_e 为超级电容器储存的电量； C_F 为理想电容； U_F 为超级电容器的电压； ε 为电解质常数； A 为电极表面积； d 为电极间距。

1.3 蓄电池通用模型

蓄电池是一种电化学储能，其储能原理是通过电极材料的氧化还原反应将化学能与电能进行转换，蓄电池有多种等效电路模型，目前普遍采用经典的Shepherd模型来描述新能源发电中的蓄电池行为，该模型前提是忽略温度和蓄电池自放电影响，认为其内阻 R_b 在储能工作中保持恒定，其等效电路如图3所示。

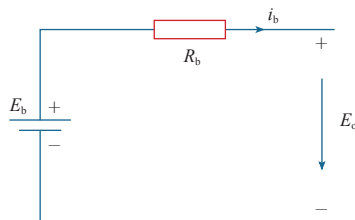


图3 蓄电池等效电路

蓄电池端电压表达式为

$$E_b = E_o + X e^{\left(-Y \int_0^t i_b dt\right)} - \frac{ZC}{C - \int_0^t i_b dt} \quad (3)$$

$$SOC = \frac{C - \int_0^t i_b dt}{C} \quad (4)$$

式中， E_b 为蓄电池的空载端电压； E_o 为蓄电池的初始放电电压； X 为指数区域的幅值，用以校正蓄电池开始放电时电压的快速跌落； Z 为电极板压降系数； C 为蓄电池的标准容量；SOC为蓄电池荷电状态，用来反映其存储电量的程度。

1.4 PCS原理与模型搭建

1.4.1 双向DC-DC变换器及控制

由于储能单体电压较低，需作升压处理才能满足逆变器变换需求，同时为保障储能系统能量的双向流动，HESS直流母线电压需进行准确的控制，因此，双向DC-DC变换器必不可少，拓扑结构如图4所示。其主要有充电和放电两种工作模式。当需要降压时，开关管 S_1 为主功率器件，电流由高压侧流向低压侧，变换器工作在Buck模式，储能工作在充电模式。值得注意的是，由于采用

互补工作的方式,当需要升压时,开关管 S_2 为主功率器件,电路工作在Boost模式,电流由低压侧流向高压侧,储能工作在放电模式。

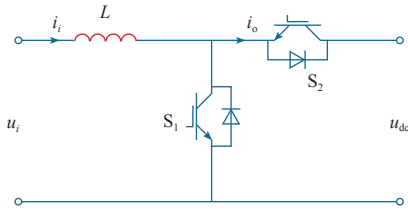


图4 DC-DC变换器拓扑

图中, S_1 、 S_2 为功率开关管; L 为变换器电感; C 为直流母线电容。本文DC-DC变换器中,开关管采用PWM方式工作,上下管互补导通,实现同步双向流动,减小导通损耗。对双向DC-DC变换器电路进行数学建模有

$$L \frac{di_i}{dt} + Ri_i = u_i - du_{dc} \quad (5)$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = di_i - i_o \quad (6)$$

式中, d 为占空比; u_i 为储能单元端口电压; i_i 为储能单元端口电流; u_{dc} 为变换器输出直流电压; i_o 为变换器输出电流。

双向DC-DC变换器的控制目的是保持直流母线电压恒定以抑制母线纹波,其稳压控制策略如图5所示。DC-DC电路的功率开关管控制信号由直流母线电压 u_{dc} 与参考电压 u_{dc}^* 的误差决定,其误差信号经过PI调节即为电感电流参考值 i^* ,将实际电流值 i_i 与之比较,其误差信号经过PI调节进而通过PWM调制控制开关管通断。

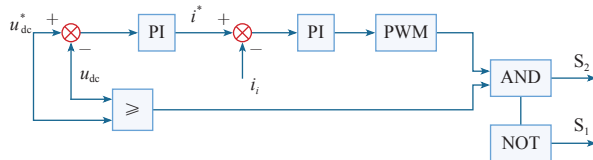


图5 DC-DC直流母线电压恒定控制

1.4.2 双向DC-AC变换器及控制

储能系统作为直流系统,欲实现与交流系统电网之间的功率交换,DC-AC变换器必不可少,它是两者连接的桥梁,其控制技术直接关系到HESS系统的工作性能。双向DC-AC变换器的拓扑如图

1右半部分所示, u_{dc} 为直流母线电压; L 、 C 和 R 分别为滤波电感、滤波电容和电感电阻; u_{abc} 为电网电压。本文采用三相桥式DC-AC变换电路,各桥臂上下管互补导通,采用SPWM调制,当HESS放电时,能量由DC侧流向AC侧,变换器处于有源逆变状态;当HESS进行充电时,能量由AC侧流向DC侧,变换器处于整流状态。由于超级电容具有较强的功率吞吐功能,这就使DC-AC变换器具有很快的动态响应特性,以平抑交流侧的功率波动。

将电路视为三个单相系统进行分析,推导旋转坐标系下并网DC-AC变换器数学模型,对各物理量开关平均处理后可以得到

$$\frac{1}{2} u_{dc} (2d_{abc} - 1) = L \frac{di_{abc}}{dt} + Ri_{abc} + u_{abc} \quad (7)$$

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = i_i - d_{abc} i_{abc} \quad (8)$$

式中, d_{abc} 为三相占空比向量; i_{abc} 为三相电流向量,令 $d'_{abc} = 2d_{abc} - 1$,则

$$u_{dc} d'_{abc} = 2 \left(L \frac{di_{abc}}{dt} + Ri_{abc} + u_{abc} \right) \quad (9)$$

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = i_i - \frac{1}{2} (1 + d'_{abc}) i_{abc} \quad (10)$$

式(9)和式(10)为DC-AC变换器三相静止坐标系下的数学模型,将其经过式(11)变换矩阵 T_{32} 进行等效坐标变换,可以得到其两相静止坐标数学模型,即

$$T_{32} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$u_{dc} d'_{\alpha\beta 0} = 2 \left(L \frac{di_{\alpha\beta 0}}{dt} + Ri_{\alpha\beta 0} + u_{\alpha\beta 0} \right) \quad (12)$$

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = i_i - d'_{\alpha\beta 0} i_{\alpha\beta 0} - \frac{3}{2} i_0 \quad (13)$$

将上式移去零序分量后通过式(14)变换矩阵 $T_{\theta+}$ 进行正序旋转坐标变换,可以得到正序两相静止坐标数学模型,即

$$T_{\theta+} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$u_{dc} d'_{dq+} = 2 \left(L \frac{di_{dq+}}{dt} + \begin{pmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{pmatrix} i_{dq+} + R i_{dq+} + u_{dq+} \right) \quad (15)$$

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = i_i - \frac{1}{2} d'_{dq} i_{dq} \quad (16)$$

DC-AC侧主要控制策略有PQ控制策略、平抑功率波动以及v/f控制策略。对本文的HESS功能需求而言，主要是满足功率跟踪需求，服从上层优化控制给出的HESS功率参考值，故DC-AC变流器控制策略采用电流源模式，即工作在PQ控制模式下，其核心为输出电流控制，本文采取在同步旋转坐标系下，对d-q轴电流进行跟踪控制的方式实现。在此基础上，根据不同的应用目标计算电流参考值，进而实现相应控制目的。为便于稳态计算与优化，本文忽略部分控制细节，在上文建立的并网DC-AC变换器数学模型基础上，得到其电流控制框图，如图6所示。

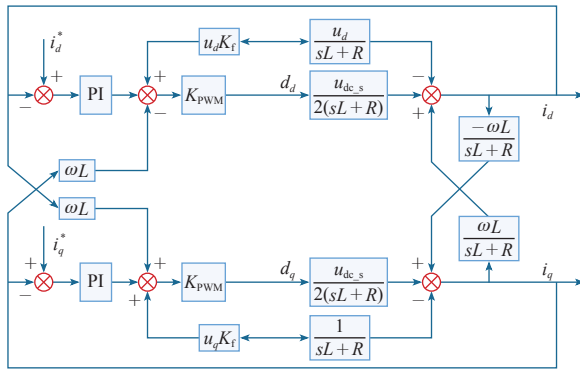


图6 PQ控制电流控制框图

图6中， L 为出口电路滤波电感； R 为电感电阻； $u_{dc}^{(ss)}$ 为直流母线电压稳态值； d_d 、 d_q 分别为d轴和q轴占空比； K_{PWM} 为PWM调制系数，可取 $K_{PWM} = 2/u_{dc}^{(ss)}$ 。

根据上文建立的DC-AC数学模型，可列出如下方程

$$\begin{cases} i_d = \frac{[(i_d^* - i_d)PI(s) - \omega L i_q + K_f u_d]}{sL + R} - \frac{u_d}{sL + R} + \frac{\omega L}{sL + R} i_q \\ i_q = \frac{[(i_q^* - i_q)PI(s) + \omega L i_d + K_f u_q]}{sL + R} - \frac{u_q}{sL + R} - \frac{\omega L}{sL + R} i_d \end{cases} \quad (17)$$

式中， $PI(s)$ 为PI控制器传递函数； K_f 为电网电压前馈系数，取 $K_f = 1$ 。

略去采样控制延时，则式中电网电压扰动可完全消除；消除电网电压扰动后，式(17)可写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{PI(s)}{sL + R} & 0 \\ 0 & \frac{PI(s)}{sL + R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{PI(s)}{sL + R} & \frac{\omega L}{sL + R} \\ \frac{-\omega L}{sL + R} & \frac{PI(s)}{sL + R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (18)$$

通过式(18)可得到DC-AC电流闭环传递函数矩阵为

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{sk_p + k_i}{s^2 L + s(R + k_p) + k_i} & 0 \\ 0 & \frac{sk_p + k_i}{s^2 L + s(R + k_p) + k_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{pmatrix} \quad (19)$$

2 仿真和实验研究

在PSCAD/EMTDC中对HESS的超级电容与蓄电池进行充放电特性仿真，验证所提出的DC-DC控制策略的有效性。

超级电容部分：设定初始超级电容容量为40 F，端电压为200 V，最大充电电压为260 V，最小放电电压为150 V。仿真初始微电网并网运行，2 s时微电网进入孤岛运行。仿真结果如图7所示，在并网时刻超级电容进行充电，DC-DC电路运行在Buck模式；在1 s时刻，微电网孤岛运行，超级电容进入放电状态，DC-DC电路运行在Boost模式，在充放电过程中，直流母线电压始终维持在400 V左右。

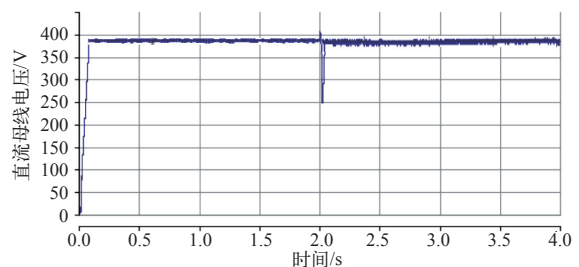


图7 超级电容DC-DC直流母线电压

蓄电池部分设定其额定容量 $500\text{ kW}\cdot\text{h}$ ($\text{MW}\cdot\text{h}$), 工作电压范围为 $490\sim 580\text{ V}$, 额定电压为 504 V , 初始荷电状态为 20% , 负荷为 0.5 MW ; 微电网初始并网运行, 1 h 时进入孤岛运行, 仿真结果如图8所示。

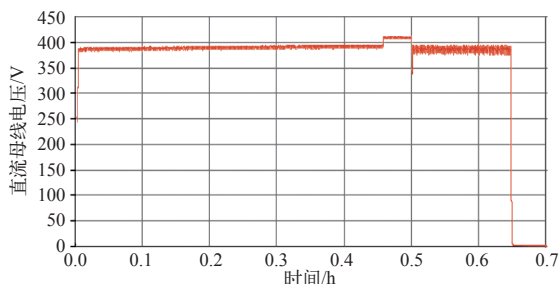


图8 蓄电池DC-DC直流母线电压

蓄电荷电状态如图9所示。当外部系统下达充电指令, 此时荷电状态 (SOC值) 小于 85% 时, 蓄电池进行充电, DC-DC电路运行在Buck模式, 其值增大; 当荷电状态 (SOC值) 到达 85% 时, 蓄电荷电状态和端电压保持基本不变, 在 0.5 h 时刻, 微电网孤岛运行, 蓄电池进入放电状态, DC-DC电路运行在Boost模式, SOC值降低。在充放电过程中, 通过DC-DC侧的稳压控制, 直流母线电压维持在 400 V 左右。为了保证蓄电荷电状态不低于 10% , 约 0.65 h 后蓄电池放电结束, 此后蓄电荷电状态维持在 10% 不变。

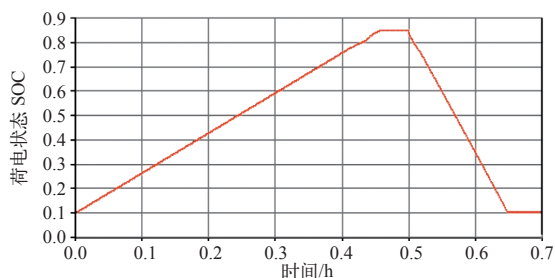
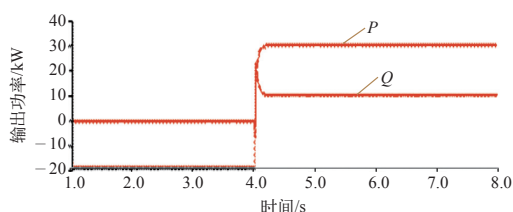
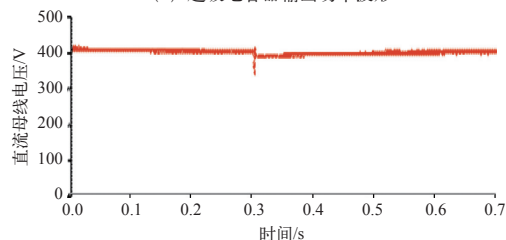


图9 蓄电荷电状态

在上文建立的仿真平台上, 以超级电容为例, 建立双向DC-AC变换器模型, 验证其 PQ 控制模式下跟踪参考功率指令的有效性。直流侧电压 400 V , 滤波电感 5 mH , 滤波电容 $5\text{ }\mu\text{F}$, 电流内环比例系数为 60 , 积分系数为 0.02 , 初始超级电容端电压为 400 V , 负荷为 $20\text{ kW}/10\text{ kvar}$, $0\sim 4\text{ s}$ 后微电网并网运行, $4\sim 8\text{ s}$ 后微电网孤岛运行, 仿真结果如图10所示。



(a) 超级电容器输出功率波形



(b) 直流母线电压仿真

图10 DC-AC变换器 PQ 控制策略仿真

由图中可知, 在并网时刻超级电容约以 20 kW 的功率进行恒功率充电; 在 4 s 时刻, 微电网孤岛运行, 超级电容进入放电状态。为满足负荷需求, 应遵循 $20\text{ kW}/10\text{ kvar}$ 的功率参考指令进行恒功率放电。在充放电过程中, 直流母线电压维持在 400 V 左右。为进一步验证 PQ 控制策略的有效性, 在 8 s 时改变功率参考指令, P_{ref} 由 30 kW 增加至 50 kW , Q_{ref} 不变, 仿真结果如图11所示。当有功功率和无功功率的参考值突然发生变化时, DC-AC变换器能迅速跟踪功率参考指令的变化。

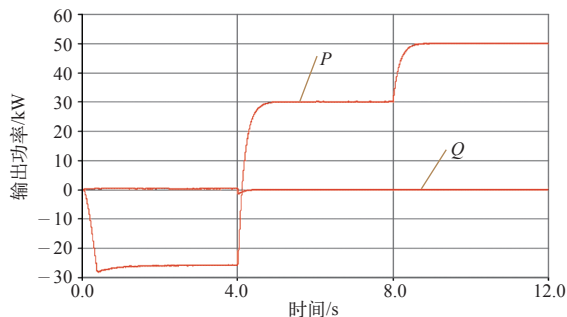


图11 功率参考指令跟踪仿真

3 结束语

本文主要对混合储能系统进行了建模与仿真分析, 介绍了超级电容与蓄电池的工作原理与通用模型; 提出了一种基于能量转换 (PCS) 模型的超级电容器蓄电池混合储能系统, PCS模型是HESS控制模型的核心, 它是连接HESS与电网的核心设备, 模型中包括双向DC-DC变换器与双向

DC-AC变换器模型,分别介绍了其拓扑结构,推导出其数学模型并对其控制策略进行分析,在双向DC-AC变换器中,推导了PQ控制模式下的闭环电流传递函数。此外,在PSCAD/EMTDC软件中搭建了包括超级电容与蓄电池的HESS模型,验证了DC-DC侧直流母线稳压控制的有效性和DC-AC侧PQ控制策略的有效性,同时验证了HESS的功率分配,证明其在平抑可再生能源发电波动方面的显著效果。

参考文献

- [1] 王明俊. 智能电网与智能能源网[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 1-5.
- [2] 赵春江, 杨金焕, 陈中华, 等. 太阳能光伏发电应用的现状及发展[J]. 节能技术, 2007, 25(5): 461-465.
- [3] Liaw C M, Chiang S J, Huang S C. Three-phase multi-functional battery energy storage system[J]. IEE Proceedings - Electric Power Application, 1995, 142(4): 275-284.
- [4] 赵静波, 雷金勇, 甘德强. 电池储能装置在抑制电力系统低频振荡中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 93-100.
- [5] 王晓峰, 解晶莹, 孔祥华, 等. “超电容”电化学电容器研究进展[J]. 电源技术, 2001, 25(3): 166-169.
- [6] 张步涵, 王云玲, 曾杰. 超级电容器储能技术及其应用[J]. 水电能源科学, 2006, 24(5): 50-53.
- [7] Ribeiro P, Crow M. Energy storage systems for advanced power applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(12): 45-49.
- [8] Dougal R A, Liu Shengyi, White Ralph E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 175-180.

(收稿日期: 2016-04-06) **EA**

广告 | AD



Weidmüller

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪 —— 高效透明的生产电能监测

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪不仅能监测电能的消耗,它还能监测电能质量的基本参数和分析来自不同导体的电流的细微差别,使电力行业用户能够快速地了解生产设备中电能参数的变化情况,保证其稳定和高效地使用。具有综合功能的Energy Meter电力参数测量仪使您可以将生产点的能源网络分块测量,尽可能精确地进行监测,配备有一体的液晶显示屏,重要的监测数据如电压、电流、功率和能耗都能一目了然。

扫一扫,关注魏德米勒官方微信



Let's connect.

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn