

基于小波包混合储能系统的风功率波动控制策略^{*}

张保明, 陈洁, 付菊霞, 邓浩

(新疆大学电气工程学院, 新疆乌鲁木齐 830047)

摘要: 随着风力发电的发展, 风电波动带给电网的影响越来越明显, 平滑风电出力显得很重要。针对风电功率波动特性, 提出基于小波包分解法, 得到风电并网功率、混合储能系统参考功率和充放电状态。结合蓄电池和超级电容的荷电状态, 提出了能量管理协调控制策略, 实现了储能系统内部功率修正, 算例结果表明: 能量管理协调控制策略能完成混合储能系统内部功率最佳修正, 且可以有效的平滑风电出力。最后以实际风电数据为依据, 在 MATLAB 中建立了数学仿真模型, 证明了该控制策略的有效性。

关键词: 风力发电; 混合储能系统; 小波包分解; 能量管理协调控制策略; 功率平滑

中图分类号: TM 734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)03-0075-06

doi: 10.12177/emca.2019.158

Control Strategy of Wind Power Fluctuation Based on Wavelet Packet Hybrid Energy Storage System^{*}

ZHANG Baoming, CHEN Jie, FU Juxia, DENG Hao

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: With the development of wind power generation, the impact of wind power fluctuations on the grid is becoming more and more obvious, and smoothing wind power output is very important. Aiming at the fluctuation characteristics of wind power, a wavelet packet decomposition method is proposed to obtain the wind power connected to grid, the reference power of the hybrid energy storage system, and the state of charge and discharge. Based on the state of charge of the battery and super-capacitor, the coordination control strategy realizes the internal power correction of the energy storage system. The results of the calculation examples show that the coordination control strategy can complete the optimization correction of the internal power of the hybrid energy storage system and effectively smooth the wind power output. Based on actual wind power data, by establishing a mathematical simulation model in MATLAB, the effectiveness of the coordination control strategy is proved.

Key words: wind power generation; hybrid energy storage system; wavelet packet decomposition; energy management coordination control strategy; power smoothing

0 引言

由于风的间歇性和不稳定性, 使风电具有不稳定特点, 表现为输出功率不稳定、波动幅度较大, 在进行并网时, 影响电力系统运行的可靠性^[1-2]。通过控制风机的状态以控制输出功率, 从而达到平抑功率的效果, 缺点是调节能力的限

制, 造成风能浪费。给风电场增加储能系统, 比前一种平抑风电波动的效果更好, 但成本较高^[3-4]。

在混合储能选择方面, 文献[5]建立单一蓄电池储能系统数学模型, 以蓄电池储能系统平滑风电功率的波动, 提高了电网的稳定性。文献[6-7]建立单一超级电容储能系统数学模型, 分别利用串联、并联超级电容的特点来提高输出

收稿日期: 2019-11-28; 收到修改稿日期: 2019-12-29

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51467020); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2019D01C078)

作者简介: 张保明(1990—), 男, 硕士, 研究方向为风电并网和混合储能容量配置。

电压的可靠性和平滑风电场输出功率的波动。储能系统分为功率型和能量型:超级电容(功率型)寿命长、响应速度快、容量小,比较适合于周期小于 1 min、频率大于 1.67×10^{-2} Hz 场合;蓄电池(能量型)响应速度慢、寿命短、容量大,比较适合于周期在 1~60 min、频率小于 1.67×10^{-2} Hz 场合。文献[8]将蓄电池和虚拟储能协调控制与可变滤波时间常数相结合,提出用于平抑微网联络功率波动的控制策略。文献[9]提出一种采用鲁棒控制算法的电池储能系统,平抑风电场功率的波动。文献[10-11]提出的混合储能系统(HESS)可以有效平抑风电功率波动,同时延长储能系统使用寿命的优势。本文从大容量和大功率 2 方面考虑,采用蓄电池和超级电容组成的 HESS。

在风功率分解和能量管理控制方面,文献[12]采用滑动平均算法和低通滤波算法平滑风电功率波动量,由于风速具有非线性和不稳定的特征,低通滤波时间常数难以确定,可能存在频率混叠现象,不能精确提取风功率信号特征。文献[13]的小波包相对于滑动平均算法和低通滤波算法在分解处理非平稳信号时具有明显的优势,更适用于风电场功率波动。文献[14]采用模型预测控制算法得到并网功率,但难以分析系统各参数对控制效果的影响。文献[15]提出一种基于经验模态分解(EMD)的储能系统平滑风电出力方法,但 EMD 存在边界效应和模态混叠问题,且未充分考虑最大充放电功率约束。文献[16]利用小波包分频进行风功率分配并采用模糊控制理论对 HESS 进行充放电功率修正,采用小波包对风功率进行分解,分解过程中需选择基函数,分解结果随基函数的不同而发生变化。文献[17]提出采用双层模糊控制策略实现储能设备间的协调控制,但控制精度较低,容易出现平抑不到位现象。

基于以上研究成果,本文以风电场接入电网的国家并网标准为依据,结合储能设备充放电状态(SOC)和充放电功率需求,提出 HESS 能量管理协调控制策略。通过小波包分解初次分配给蓄电池和超级电容参考功率和充放电指令,再通过能量管理协调控制策略对蓄电池和超级电容功率大小和充放电指令进行调整,保证 SOC 工作在合

理范围,同时符合国家并网标准规定。以新疆某风电场的历史数据为研究依据,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,验证了该控制策略的有效性。

1 基于小波包分解的分配方法

1.1 小波包分解基本原理

小波包适合于非平稳信号的处理,特别是对于渐变信号的处理,相对于滑动平均算法和低通滤波算法更加适用于风电功率波动分析。小波包分解由小波分解的基础上改进而来,具有更高的分辨率,改善了小波变换在高频和低频段频率混叠的现象。分解原始信号,得到高频信号和低频信号,然后对分解出来的信号再进行高频信号和低频信号的分解,直到达到分解要求。图 1 所示为小波包分解树原始信号的示意图。其中, S 是原始风电功率信号, $S_{1,0}$ 、 $S_{1,1}$ 分别是第一层低频信号和低频信号。

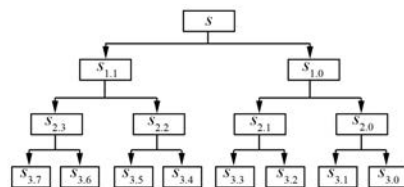


图 1 波包分解示意图

由图 1 可知,分解结果是将原始信号映射到 $2n$ 个小波包子空间中,从而形成一个完整的二叉树^[15]。

分解算法:

$$\begin{cases} d_{l,0}^{j,2n} = \sum_k h_{k-2l} d_{k-2l}^{j-1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_k g_{k-2l} P_k^{j-1,n} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d_{l,0}^{j,2n}$ 、 $d_l^{j,2n+1}$ 为小波包分解系数; h_{k-2l} 为低通滤波器组; g_{k-2l} 为高通滤波器组。

假设风电输出功率为 $P(t)$, 对其进行 n 层小波包分解, 表达式如下:

$$\begin{cases} P_{n,0}^n(t) = \sum_k h_{k-2l} P_{n-1,0}^n(t) \\ P_{n,1}^n(t) = \sum_k g_{k-2l} P_{n-1,0}^n(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{n,0}^n(t)$ 为第 n 层分解低频系数; $P_{n,1}^n(t)$ 为第 n 层分解高频系数; $P_{n-1,0}^n(t)$ 为第 $n-1$ 层分解重构

信号。

重构算法:

$$d_l^{j-1,n} = \sum_k (\overline{h_{k-2l}} d_k^{j,2n} + \overline{g_{k-2l}} d_k^{j,2n+1}) \quad (3)$$

第 n 层小波包重构算法为

$$\begin{cases} P_{n,0}(t) = \sum_k [\overline{h_{k-2l}} P_{n,0}^{2n}(t) + \overline{g_{k-2l}} P_{n,0}^{2n+1}(t)] \\ P_{n,1}(t) = \sum_k [\overline{h_{k-2l}} P_{n,1}^{2n}(t) + \overline{g_{k-2l}} P_{n,1}^{2n+1}(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{n,0}(t)$ 为第 n 层低频重构信号; $\overline{h_{k-2l}}$ 为重构低通滤波系数; $P_{n,0}^{2n}(t)$ 、 $P_{n,0}^{2n+1}(t)$ 为低频重构系数; $\overline{g_{k-2l}}$ 为重构高通滤波系数; $P_{n,1}(t)$ 为第 n 层高频重构信号; $P_{n,1}^{2n}(t)$ 、 $P_{n,1}^{2n+1}(t)$ 为高频重构系数^[17]。

1.2 HESS 功率分配方法

$$\begin{cases} P_w = P_o + P_{hess} \\ P_{hess} = P_b + P_{sc} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_w 为风电总出力; P_o 为并网功率; P_{hess} 为混合储能系统输出功率; P_b 为蓄电池储能装置输出功率; P_{sc} 为超级电容器组输出功率。

鉴于 DB8 小波基函数在非平稳振动信号分析较好的结果, 本文选择 DB8 作为信号分析的小波基函数, 对风电总出力 P_w 进行 9 层分解, 其中 P_1 为低频信号; $P_{h1} \sim P_{h2}$ 为次高频信号, $P_{h3} \sim P_{h511}$ 为高频信号。

风功率分配如下:

$$\begin{cases} P_w = P_1 + P_{h1} + P_{h2} + P_{h3} + \dots + P_{h511} \\ P_o = P_1 \\ P_{hess} = P_{h1} + P_{h2} + P_{h3} + \dots + P_{h511} \end{cases} \quad (6)$$

2 储能设备模型

本文根据储能设备在工作期间的充放电功率得到其剩余容量, 由剩余容量与 SOC 之间的关系建立数学模型。储能装置的 SOC 的计算式为

$$\begin{cases} SOC_m(t) = \frac{Q_{rm}}{Q_m} \times 100\% \\ Q_{rm} = Q_m^{ini} + \int_0^t \left(\lambda_{m,ch} P_{m,ch}^t + \frac{P_{m,dis}^t}{\lambda_{m,dis}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $SOC_m(t)$ 为 t 时刻储能装置的 SOC; m 为蓄电池或超级电容器; Q_{rm} 为 t 时刻储能设备的容量; Q_m 为储能设备的额定容量; Q_m^{ini} 为储能设备初始

容量; $\lambda_{m,ch}$ 为储能设备充电效率; $\lambda_{m,dis}$ 为储能设备放电效率, 本文依据文献[5], 均以最大充放电效率工作 ($\lambda_{m,ch} = 0.85$, $\lambda_{m,dis} = 0.9$); $P_{m,ch}^t$ 为储能设备的充电功率, $P_{m,ch}^t > 0$; $P_{m,dis}^t$ 为储能设备的放电功率, $P_{m,dis}^t < 0$ 。

从安全和使用寿命 2 方面考虑, 同时有能力平滑下一时刻风电出力, 应保证储能设备工作在 SOC 和充放电功率允许范围内, 需满足:

$$\begin{cases} SOC_{m,min} \leq SOC_m(t) \leq SOC_{m,max} \\ P_{m,min} \leq P_m(t) \leq P_{m,max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $SOC_{m,min}$ 和 $SOC_{m,max}$ 分别为储能设备最小和最大的 SOC; $P_{m,min}$ 和 $P_{m,max}$ 分别为储能设备充电功率下限和放电功率上限。

3 储能系统控制策略

结合能量型和功率型储能互补的特点, 考虑响应速度和使用寿命, 因此合理分配功率就显得尤为重要。本文在模糊控制的基础上^[11], 制定策略如图 2 所示。具体如下: (1) 根据储能系统输出功率方向 $[+/-P_{b-ref}(t), +/-P_{c-ref}(t)]$, 划分控制区域; (2) 根据蓄电池和超级电容的 SOC 状态再次进行控制区域划分 [蓄电池 (SOC1) 0.2~0.8; 超级电容 (SOC2) 0.1~0.9], 两者输出功率协调平滑风电并网功率; (3) 满足并网波动率准则, 可知能量管理控制策略共有 36 种工作模式, 着重介绍控制列表中几种典型的工作模式。能量管理控制策略如表 1 所示。

$$P_1 = P_{b-ref}(t) \quad (9)$$

$$P_3 = \begin{cases} \min[P_{b-ref}(t) + P_{c-ref}(t), P_{b-rated}(t)], \\ P_{b-ref}(t) + P_{c-ref}(t) \geq 0 \\ \max[P_{b-ref}(t) + P_{c-ref}(t), -P_{b-rated}(t)], \\ P_{b-ref}(t) + P_{c-ref}(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$P_2 = P_{c-ref}(t) \quad (11)$$

$$P_4 = \begin{cases} \min[P_{b-ref}(t) + P_{c-ref}(t), P_{c-rated}(t)], \\ P_{b-ref}(t) + P_{c-ref}(t) \geq 0 \\ \max[P_{b-ref}(t) + P_{c-ref}(t), -P_{c-rated}(t)], \\ P_{b-ref}(t) + P_{c-ref}(t) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{b,min} \leq P_3 \leq P_{b,max} \\ P_{c,min} \leq P_4 \leq P_{c,max} \end{cases} \quad (13)$$

表 1 能量管理控制策略

模式	蓄电池 SOC1			电池状态		超级电容 SOC2			电容状态		P_b	P_{sc}
	<0.2	0.2~0.8	>0.8	充电	放电	<0.1	0.1~0.9	>0.8	充电	放电		
1	✓			✓		✓			✓		P_1	P_2
2	✓			✓		✓				✓	P_3	0
3	✓				✓	✓			✓		0	P_4
4	✓				✓	✓				✓	0	0
5	✓			✓			✓		✓		P_1	P_2
6	✓			✓			✓			✓	P_1	P_2
7	✓				✓		✓		✓		0	P_4
8	✓				✓		✓			✓	0	P_4
9	✓			✓				✓	✓		P_3	0
10	✓			✓				✓		✓	P_1	P_2
11	✓				✓			✓	✓		0	0
12	✓				✓			✓		✓	0	P_4
13		✓		✓		✓			✓		P_1	P_2
14		✓		✓		✓				✓	P_3	0
15		✓			✓	✓			✓		P_1	P_2
16		✓			✓	✓				✓	P_3	0
17		✓		✓			✓		✓		P_1	P_2
18		✓		✓			✓			✓	P_1	P_2
19		✓			✓		✓		✓		P_1	P_2
20		✓			✓		✓			✓	P_1	P_2
21		✓		✓				✓	✓		P_3	0
22		✓		✓				✓		✓	P_1	P_2
23		✓			✓			✓	✓		P_3	0
24		✓			✓			✓		✓	P_1	P_2
25			✓	✓		✓			✓		0	P_4
26			✓	✓		✓				✓	0	0
27			✓		✓	✓			✓		P_1	P_2
28			✓		✓	✓				✓	P_3	0
29			✓	✓			✓		✓		0	P_4
30			✓	✓			✓			✓	0	P_4
31			✓		✓		✓		✓		P_1	P_2
32			✓		✓		✓			✓	P_1	P_2
33			✓	✓				✓	✓		0	0
34			✓	✓				✓		✓	0	P_4
35			✓		✓			✓	✓		P_3	0
36			✓		✓			✓		✓	P_1	P_2

式中: P_1 、 P_2 为参考功率; $P_{b-ref}(t)$ 为蓄电池参考功率; P_3 、 P_4 为协调控制输出功率; $P_{c-ref}(t)$ 为超级电容参考功率; $P_{b-rated}(t)$ 为蓄电池额定功率; $P_{c-rated}(t)$ 为蓄电池和超级电容额定功率。

模式 1: 当 SOC1 和 SOC2 均低于最低限度时,由小波包分解得到蓄电池和超级电容的状态为参考充电状态,为了保证 SOC1 和 SOC2 在正常

范围内,设置蓄电池和超级电容充电功率等于小波包分解所分配的参考功率。

模式 4: 当 SOC1 和 SOC2 均低于最低限度时,由小波包分解得到蓄电池和超级电容的状态为参考放电状态,为了防止蓄电池和超级电容过度放电,使放电功率等于零。

模式 7: 当 SOC1 低于最低限度时,由小波包

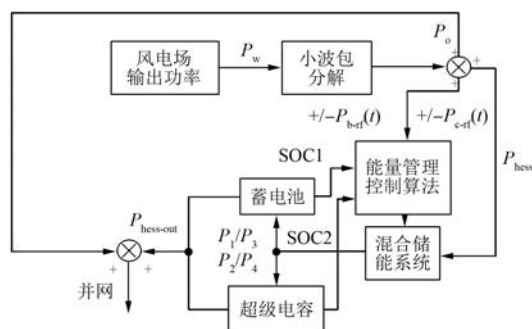


图2 混合储能技术控制框图

分解得到蓄电池状态为参考放电状态, SOC2 在正常范围内, 超级电容状态为参考充电状态, 为了防止蓄电池过度放电, 使蓄电池放电功率等于零, 此时超级电容的充电功率为协调控制分配功率。

模式 9: 当 SOC1 低于最低限度时, 由小波包分解得到蓄电池状态为参考充电状态, SOC2 高于设定最大值, 超级电容状态为参考充电状态, 为了防止超级电容过度充电, 设置超级电容充电功率等于零, 此时蓄电池的充电功率为协调控制分配功率。

模式 19: 当 SOC1 和 SOC2 均在正常范围内时, 由小波包分解得到蓄电池状态为参考放电状态, 超级电容状态为参考充电状态, 为了保证 SOC1 和 SOC2 在正常范围内, 设置蓄电池和超级电容充电功率等于小波包分解所分配的参考功率。

模式 32: 当 SOC1 高于设定最大值时, 由小波包分解得到蓄电池状态为参考放电状态, SOC2 在正常范围内, 超级电容状态为参考放电状态, 为了保证 SOC1 和 SOC2 在规定正常范围内, 使蓄电池和超级电容充电功率等于小波包分解所分配的参考功率。

4 仿真及结果分析

基于上述小波包分解方法和能量管理控制策略, 本文在 MATLAB/Simulink 中搭建数学模型进行仿真试验。以新疆某风电场 1 台风机的历史数据为例, 该风机容量为 2.5 MW, 采样间隔为 10 s, 蓄电池和超级电容的 SOC 初始值和期望值均为 0.5, 取蓄电池和超级电容的额定容量分别为 0.1 MWh 和 0.03 MWh。风电场输出功率和并网功

率对比如图 3 所示。

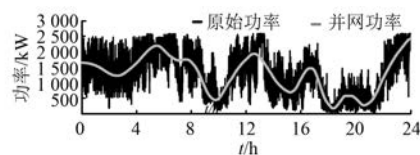


图3 风电场输出功率和并网功率对比

经过小波包分解, HESS 输出功率如图 4 所示。2 种分解方法对应平抑目标功率的波动率曲线如图 5 所示。蓄电池和超级电容充放电参考功率如图 6、图 7 所示。

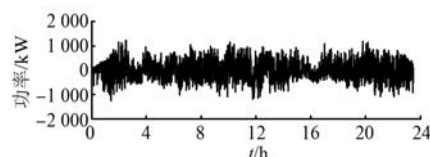


图4 HESS 的输出功率

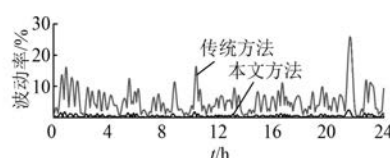


图5 2种分解方法对应平抑目标功率的波动率曲线

从图 4 可以看出, HESS 波动率和功率较大, 如果不加以控制, 对电网的冲击比较明显。图 5 中 2 种方法相较而言, 小波包方法得到的目标功率波动率更小, 更加符合要求。

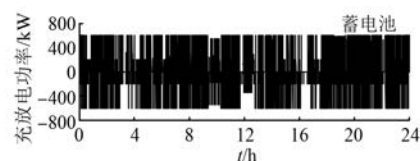


图6 蓄电池充放电参考功率

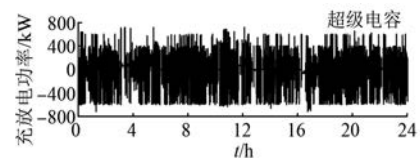


图7 超级电容充放电参考功率

通过小波包方法得到风电输出功率 1 min 最大波动率为 2.27%, 10 min 最大波动率为 21.34%。图 8、图 9 所示分别为平抑前后风功率 1、10 min 波动率。

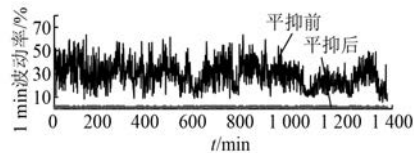


图8 平抑前后风功率 1 min 波动率

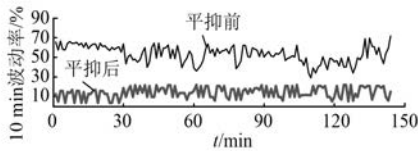


图9 平抑前后风功率 10 min 波动率

能量管理协调控制方法对比指标如表 2 所示。

表 2 能量管理协调控制方法对比指标

储能系统	充、放电次数/次	
	无控制策略	有控制策略
蓄电池	226	123
超级电容	571	256

蓄电池和超级电容 SOC 状态如图 10 所示。

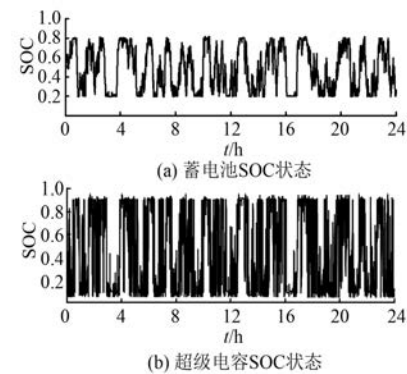


图 10 蓄电池和超级电容 SOC 状态

通过对比有无本文控制策略得到的蓄电池和超级电容充放电次数,说明所提控制策略可有效延长混合储能设备寿命,减少维修和更换费用,具有一定的经济性。

由图 10 可以看出,2 种储能设备间具有能量互补的特点,当蓄电池能量比较低时,超级电容会对蓄电池进行补偿,反之也同样成立,蓄电池和超级电容的密切配合可有效提高平抑效果。

5 结 语

(1) 本文采用小波包分解方法将风电场原始输出功率分解成低频功率分量、中频功率分量、高频功率分量 3 部分,结合蓄电池和超级电容器在性能上的互补特性建立 HESS 对原始输出功率进行平抑。

(2) 由小波包分解得到储能系统的参考功率和参考充放电状态,结合储能系统各自的 SOC 状态再次对储能系统的充放电功率和充放电状态进行调整,由此产生两者输出功率协调平滑 36 种运行模式下的能量管理控制策略。

(3) 在 MATLAB/Simulink 中搭建数学模型,通过检测储能装置 SOC 和充放电状态,调整储能设备充放电功率以及优化风电并网功率,验证了该方案的可行性,具有现实意义。

【参考文献】

[1] 康龙云,郭红霞,吴捷,等.分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J].电网技术,2010,34(11): 43.

[2] 袁铁江,陈洁,刘沛汉,等.储能系统改善大规模风电场出力波动的策略[J].电力系统保护与控制,2014,42(4): 47.

[3] 茹雪艳.采用中间储能装置抑制风力并网功率波动的实现方法[D].淮南:安徽理工大学,2017.

[4] 管俊,高赐威.储能技术在抑制风电场功率波动方面的研究综述[J].电网与清洁能源,2011,27(4): 48.

[5] 刘颖.储能系统平抑风电功率波动的研究[D].北京:华北电力大学(北京),2016.

[6] 刘金龙,李国庆,王振浩,等.超级电容器储能系统在风电场中的应用研究[J].东北电力大学学报,2011,31(4): 75.

[7] 张步涵,曾杰,毛承雄.串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用[J].电力自动化设备,2018,28(4): 1.

[8] 陈科彬,邱晓燕,刘波.风电场混合储能的小波包-SOC 分区功率控制[J].仪器仪表学报,2017,38(8): 2078.

[9] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等.考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J].电力自动化设备,2018,38(8): 174.

(下转第 94 页)

- 计算[J].微特电机,2012,40(8): 14.
- [5] 高泽梅,王淑红,武潇,等.内嵌式永磁同步电动机电感参数特性的研究[J].微电机,2015,48(6): 23.
- [6] KWAK S, KIM J, JUNG H. Characteristic analysis of multilayer-buried magnet synchronous motor using fixed permeability method[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 549.
- [7] POURAMIN A, DUTTA R, RAHMAN M F, et al. A preliminary study of the effect of saturation and cross-magnetization on the inductances of a fractional-slot concentrated-wound interior PM synchronous machine [C]//2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2015.
- [8] STUMBERGER B, STUMBERGER G, DOLINAR D, et al. Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1264.
- [9] 吕鹏,崔巍.饱和时分数槽集中绕组永磁同步电机电感计算[J].电机与控制应用,2018,45(7): 56.
- [10] 覃家财.内置式永磁同步电机电感参数对转矩的影响[D].重庆:重庆大学,2012.
- [11] 董砚,姚少灿,高国旺,等.IPMSM 交、直流电感特性有限元分析[J].河北工业大学学报,2014,43(4): 1.
- [12] 肖玉坤,戴正文,邹琳,等.永磁电机交、直流电感特性有限元分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(9): 1196.
- [13] YAMAZAKI K, KUMAGAI M. Torque analysis of interior permanent-magnet synchronous motors by considering cross-magnetization: variation in torque components with permanent-magnet configurations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3192.
- [14] CHU W Q, ZHU Z Q. Average torque separation in permanent magnet synchronous machines using frozen permeability [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(3): 1202.
- [15] 诸自强,褚文强.冻结磁导率先进技术及其在高性能电机研发中的应用(英文)[J].电工技术学报,2016,31(20): 13.

(上接第 74 页)

- [10] 徐垦.交流信号真有效值数字测量方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2006,34(2): 51.
- [11] 潘洋,王一丽,来磊,等.基于采样逼近的准同步改进算法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(3): 512.
- [12] 孟卓.改进准同步采样电力系统频率测量方法及应用研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [13] 陈志辉,姜长生,严仰光.数字电压调节器三相电压数字测量方法的研究[J].电工技术学报,2002,17(2): 96.
- [14] 苏建明,姚晖.基于半周期积分波形对称原理的电子式互感器数据失效识别研究[J].东北电力技术,2018,39(2): 59.
- [15] 陈海宏,魏巍,姚肖方,等.基于 DSP 的发电机电压扰动量采集系统[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(5): 77.

(上接第 80 页)

- [10] 张明霞,闫涛,来小康,等.电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径[J].电网技术,2018,42(5): 1370.
- [11] 刘颖明,徐中民,王晓东.基于双模糊算法的风电机组储能系统优化控制[J].高电压技术,2015,41(7): 2180.
- [12] 于芃,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,2017,39(24): 35.
- [13] 吴杰,丁明.采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(3): 7.
- [14] 孙承晨,袁越,李梦婷,等.用于能量调度的风-储混合系统运行策略及容量优化[J].电网技术,2015,39(8): 2107.
- [15] 韩晓娟,陈跃燕,张浩,等.基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(19): 8.
- [16] 王冉,王丹,贾宏杰,等.一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略[J].中国电机工程学报.2015,35(20): 5124.
- [17] 卢芸,徐骏.基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(11): 149.