

DOI: 10.7667/PSPC151820

基于飞轮储能的风力发电系统仿真

冯奕¹, 颜建虎²

(1. 南京工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对离网式风力发电系统存在电能波动大、供电可靠性差等问题, 提出采用基于无刷直流电机(BLDC)驱动的飞轮储能系统来提高离网式风力发电系统的电能质量。通过 Matlab/Simulink 对含有飞轮储能环节的离网式风力发电系统进行了仿真, 给出仿真参数。仿真结果表明, 飞轮储能系统可有效抑制风速变化带来的电能波动, 保证供电的可靠性。

关键词: 风力发电; 飞轮; 离网式; 无刷直流电机; 仿真

Simulation of wind energy generation system with flywheel storage system

FENG Yi¹, YAN Jianhu²

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A flywheel energy storage system (FESS) driven by the brushless DC machine (BLDCM) applied in the off-grid wind energy generation system (WEGS) is adopted to solve the electricity fluctuation and the power supply reliability in the off-grid WEGS. The off-grid WEGS including a FESS driven by a BLDCM is simulated by Matlab/Simulink, and the parameters are given. The simulation result shows that the FESS is effective to eliminate the fluctuation of energy caused by wind velocity variation so as to ensure the reliability of power supply.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407094).

Key words: wind power generation; flywheel; off-grid; BLDCM; simulation

0 引言

风力发电系统分为并网型和离网型两种形式^[1]。在偏远地区, 离网型风力发电系统更有应用价值。由于风速具有随机性, 发电机发出的电能有很大的波动, 故需要储能环节来提高电能质量。飞轮储能系统以其能量密度高、效率高、寿命长、维护费用低、无污染等优点, 成为解决电能波动问题的理想选择^[2-4]。

飞轮储能系统主要由大转动惯量的转子、电动机、发电机、电力转换器组成。飞轮储能的基本原理是: 电能充足时, 电机电动运行, 由电能驱动飞轮升速, 电能转变为机械能储存; 电能短缺时, 电机发电运行, 飞轮的动能转换成电能, 飞轮减速。无刷直流电机(BLDCM)具有控制简单、调速范围宽、高效率、

高功率密度的优点, 故常用它作为驱动飞轮的电机^[5-9]。美国、英国、德国、日本、瑞士、加拿大等国家已就飞轮储能技术在风力发电、太阳能发电、电动汽车、不间断电源、卫星姿态控制等方面的应用开展了广泛的研究^[5]。国内的清华大学、华北电力大学、中科院电工所、北京航空航天大学、南京航空航天大学、东南大学等科研机构 and 高校已有从事与飞轮研究相关的工作^[2]。清华大学的黄宇淇等研究了飞轮并联运行于放电模式时的控制策略, 并进行了仿真。随后提出了飞轮储能能量回馈控制的新方法“新六拍 PWM”, 缩短了电流的建立时间, 进行了仿真与实验验证^[6-7]。深圳航天科技研究院的蒙永民等先后对飞轮的充电过程和放电过程进行了仿真研究^[8-9], 放电时额外增加了升压电路。河海大学的陈定宙分别建立了永磁同步电机充电过程和放电过程的仿真模型, 未涉及发电机部分^[10]。文献[11]给出了一般的飞轮控制的流程图, 并对直流母线及飞轮和负载的部分进行了仿真。文献[12]提出了一

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51407094); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20140785); 南京工程学院引进人才科研启动基金资助项目(YKJ201534)

种无传感器的磁场定向控制算法, 进行了仿真和实验验证。华北电力大学的阮军鹏对飞轮储能系统在风电系统独立运行和并网运行两种情况下的充电过程进行了研究和仿真^[13]。

本文采用永磁同步电机(PMSM)作为风力发电机, 采用永磁无刷直流电机(PMBLDCM)作为驱动飞轮的电机。仿真研究包括 PMSM 模块、最大功率跟踪(MPPT)控制模块、PMBLDCM 及其控制模块、负载端的逆变模块、卸荷控制模块。给出了系统运行时的状态特性。研究表明, 飞轮可有效抵制电能的波动, 提高电能的质量。

1 系统拓扑结构

离网式风力发电系统的拓扑结构如图 1 所示。系统由 PMSM、可控 IGBT 整流桥、直流母线电容 C_{dc} 、卸荷电阻 R_{dump} 、负载端 IGBT 逆变器、与飞轮同轴连接的 BLDCM 及变换器等组成。其工作原理是: 发电机将吸收的风能转化为电能; 可控整流桥实现风机的最大功率跟踪; C_{dc} 储存能量, 平稳直流母线电压 V_{dc} ; 逆变器将直流电压转变为负载所需的三相交流电压。无飞轮时, 直流母线上 $i_G > i_L$ 即能量过剩时, 直流母线电容 C_{dc} 将被过度充电, V_{dc} 将升高, 反之则降低。加入飞轮后, 通过控制 BLDCM 的运行方式改变 i_F 的流向, 可吸收母线上多余的能量或向其回馈能量。若飞轮已达最大转速而能量仍过剩, 则必须导通 R_{dump} 实现分流。如此可实现 V_{dc} 的恒定。

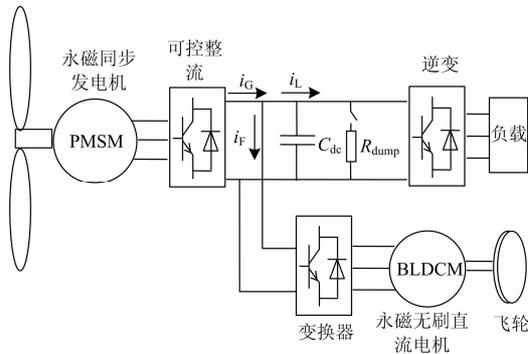


图 1 含飞轮储能环节的离网式风力发电系统图
Fig. 1 Standalone wind power system with flywheel

2 控制策略

2.1 最大功率追踪控制

风力机是整个风力发电系统能量转换的首要部件, 其输出功率为

$$P_m = C_p(\beta, \lambda) P_w = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

式中: P_w 为输入功率; C_p 为风能利用系数; β 为叶片的桨距角; ω 为风机旋转的角速度; R 为风叶半径; λ 为叶尖速比, $\lambda = \omega R / v$; ρ 为空气密度; v 为风速。

在 β 一定的前提下, $C_p - \lambda$ 曲线先上升再下降, 在某一 λ 处达到最大, 称为该桨距角对应的最佳叶尖速比 λ_{opt} 。在 β 为 0 时, 曲线总体最高; 当 β 增大时, 曲线呈现总体下移趋势。本仿真采用解析法拟合出 C_p 与 λ 的函数关系^[14]:

$$C_p = 0.5173 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta + 1} \quad (3)$$

根据式(2)、式(3)绘制出 $C_p - \lambda$ 曲线如图 2, 本文取 $\beta = 0$, $\lambda_{opt} = 8.1$, $C_{pmax} = 0.48$ 。

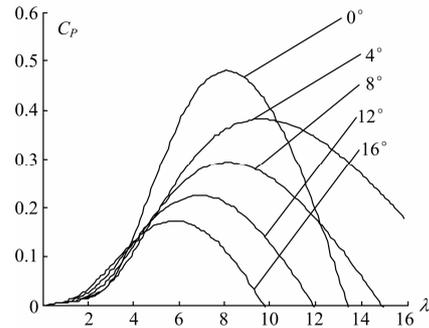


图 2 风机在不同桨距角时的 $C_p - \lambda$ 曲线
Fig. 2 $C_p - \lambda$ curve of wind turbine with different β

从风机特性可看出, 在风速和桨叶半径给定时, 为了达到 C_{pmax} , 只需控制风机的转速 $\omega = \lambda_{opt} v / R$ 。同步旋转坐标系下, 按电动机惯例, 永磁同步发电机的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + \frac{d\psi_f}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_s 为定子绕组电阻; u_d 、 u_q 分别为同步电机 d 、 q 轴电压分量; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流分量; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; ω_e 为转子的电角速度; ψ_f 为转子每极每相的永磁磁链。

发电机的运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - f\omega_r \quad (5)$$

式中: J 为转子的转动惯量; T_m 为输入的机械转矩; f 为摩擦系数; ω_r 为机械角速度。

电磁转矩 T_e 的表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

式中, p 为极对数。若控制 i_d 分量为 0, 则电磁转矩公式简化为

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (7)$$

可见, 在 i_d 分量为 0 的前提下, 控制 i_q 即可控制 T_e , 进而控制发电机的转速。控制原理如图 3。

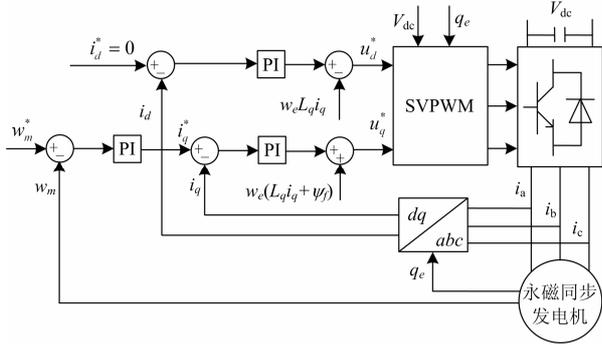


图 3 最大功率追踪控制框图

Fig. 3 Control scheme of maximum power point tracking

2.2 负载侧电压控制

负载侧的交流电压幅值为 311 V、频率为 50 Hz。本仿真将实测电压与参考电压波形作滞环比较, 给出逆变器各管的 PWM 信号。这样得到的电压波形谐波含量较大, 采用电感滤波方式可控制电压波形畸变率在 3% 以下。

2.3 飞轮充放电控制

飞轮储能单元是维护系统稳定的重要环节。当 $V_{dc} > V_{dcn}$ 且 $n < n_{max}$ 时, 飞轮充电; 当 $V_{dc} < V_{dcn}$ 且 $n > n_{max}$ 时, 飞轮放电。

飞轮充电模式控制策略为直流电压-转矩(电流)双闭环控制, 如图 4。直流母线电压的偏差值经 PI 调节后作为电磁转矩的参考值 T_{eref} , 此值需进行限幅: 飞轮转速在 n_N 以下时, T_{eref} 不超过额定转矩 T_N ; 在 n_N 以上时, T_{eref} 不超过 P_N/ω 。因 $T_e \propto p\lambda i$, T_{eref} 经比例运算得到梯形波电流的参考幅值。与换相信号相乘后得到三相电流的参考值。与实测电流进行滞环比较即得到变换器各管的通断信号。

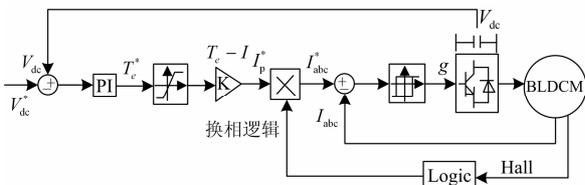


图 4 飞轮充电模式控制策略

Fig. 4 Flywheel charging control strategy

飞轮在充电时, V_{dc} 大于 BLDCM 反电动势幅值的 2 倍。放电时, 若不加以控制, 电动势幅值的 2 倍仍小于 V_{dc} , 能量无法回馈。本文选用的放电模式控制策略为半桥调制方式, 即 S_1 、 S_3 、 S_5 不动作, S_2 、 S_4 、 S_6 在相开通期间内有 PWM 动作。BLDCM 等效电路如图 5。假设此时 e_a 为正, e_c 为负, 则 S_4 动作。 S_4 开通时, 电流通过 S_2 的反并联二极管、 S_4 形成回路, 能量储存在 ac 相电感中。 S_4 关断时, 电流通过 S_2 的反并联二极管、 S_1 的反并联二极管形成回路, 对 C_{dc} 进行充电。 α 表示 PWM 信号的占空比。如同 boost 电路, 可得 $V_{ac} = 2e/(1-\alpha)$ 。根据母线电压跌落情况选择适当的 α , 就可获得 $V_{ac} > V_{dc}$, 实现能量的回馈。放电时的控制策略如图 6 所示。

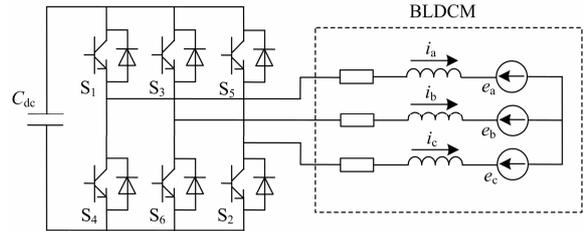


图 5 BLDCM 控制电路图

Fig. 5 Control circuit of BLDCM

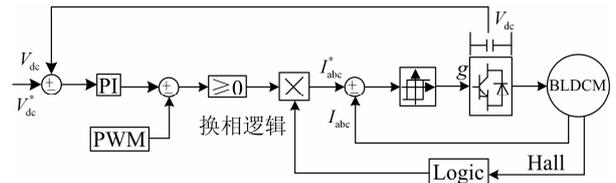


图 6 飞轮放电模式控制策略

Fig. 6 Flywheel discharging control strategy

2.4 卸荷控制

当飞轮已达最大转速, 而母线上的能量仍有剩余时, 就需要导通卸荷电阻, 消耗多余能量。本仿真中 $V_{dcn} = 600$ V, 每相负载 $R_s = 100 \Omega$, 滤波电感 $L_f = 48$ mH, 采用的 $R_{dump} = 300 \Omega$ 。

3 仿真结果

本仿真的风力模型由基本风、随机风和阵风组成, 建立的风速模型如图 7 所示。3~3.1 s 风速的突然降落将造成发电机功率的跌落, 故造成直流母线电压的跌落。在该风速状况下, 系统的各状态特性如图 8—图 12。

本仿真中的风机叶片半径 $R = 1.5$ m。发电机额定功率 $P_{GN} = 2$ kW, 定子电阻 $R_{GS} = 2.7 \Omega$, dq 轴电感 $L_{Gd} = L_{Gq} = 8.5$ mH, 每极每相永磁磁链 $\psi_{pm} = 0.175$ V·s, 转子的转动惯量 $J_G = 0.03$ kg·m², 摩擦系数 $f_G =$

$10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$, 极对数 $p_G=12$ 。

带动飞轮的 BLDCM 额定功率 $P_{FN}=600 \text{ W}$, 定子内阻 $R_{FS}=4 \Omega$, 定子电感 $L_{FS}=8.5 \text{ mH}$, 每极每相永磁磁链 $\psi_{Fpm}=0.16 \text{ V}\cdot\text{s}$, 飞轮和转子的转动惯量 $J_F=0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 摩擦系数 $f_F=10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$, 极对数 $p_F=4$, $n_{\min}=1000 \text{ r/min}$, $n_{\max}=2000 \text{ r/min}$ 。由于飞轮和电机转子是同轴连接, 因此本文直接将电机转子的转动惯量设置为 BLDCM 和飞轮的转动惯量之和来对飞轮模型进行模拟。

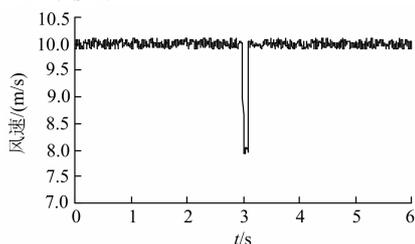


图 7 风速

Fig. 7 Wind speed

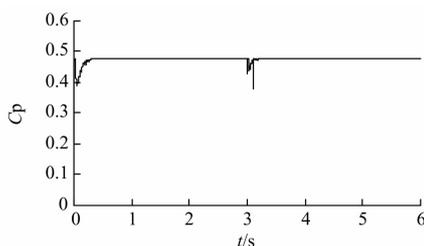


图 8 风能利用系数

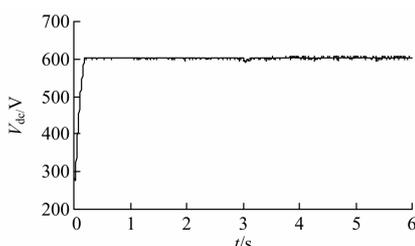
Fig. 8 C_p curve

图 9 直流母线电压

Fig. 9 DC bus voltage

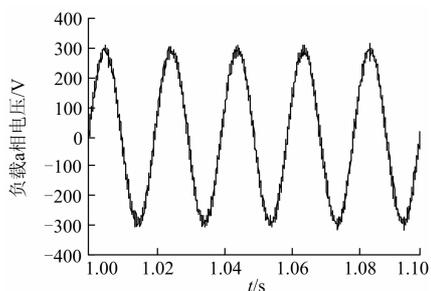


图 10 负载侧电压

Fig. 10 Load voltage

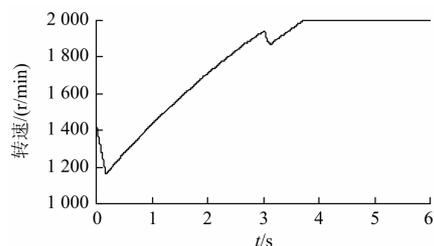


图 11 飞轮转速

Fig. 11 Speed of flywheel

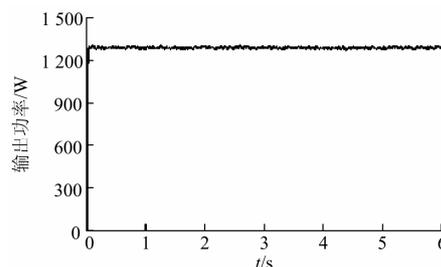


图 12 输出功率

Fig. 12 Output power

为节省仿真时间, BLDCM 的初始角速度为 150 rad/s 。结合图 9 和图 11 可得, 前 0.18 s 内, 系统未达稳定状态, V_{dc} 处于上升中, 飞轮放电。 V_{dc} 一超过 600 V , 就对飞轮进行充电, 起着调节直流电压的作用, 飞轮转速在波动中增加。 3 s 时风速突然下降, 发电机侧功率骤减, 飞轮转速从 1940 r/min 降至 1869 r/min , 向母线提供功率 148 W 。 3.1 s 时风速恢复后飞轮继续充电, 于 3.72 s 到达最大转速, 不再上升。此时母线上的盈余能量由卸荷电阻承担, 流过卸荷电阻的电流如图 13。

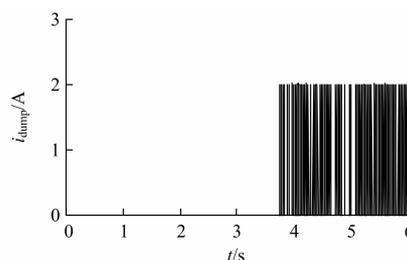


图 13 卸荷电流

Fig. 13 Dumping current

4 结论

飞轮储能技术具有使用寿命长、功率密度和储能密度高、充放电次数不受限制、安装维护方便、对环境无危害等优点, 显示其具有无可比拟的优越性。本仿真的结果显示: 将飞轮储能系统用于离网型风力发电系统中, 可有效抵制电能的波动, 提高电能的质量。

参考文献

- [1] 管维亚, 吴峰, 鞠平. 直驱永磁风力发电系统仿真与优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(29): 54-60.
GUAN Weiya, WU Feng, JU Ping. Simulation and optimized control of direct-drive permanent magnet wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(29): 54-60.
- [2] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储能系统的容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 108-114.
MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 108-114.
- [3] 卢芸, 赵永来. 基于模糊神经网络风电混合储能系统优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 113-118.
LU Yun, ZHAO Yonglai. Optimal control in a wind power hybrid energy storage system based on fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 113-118.
- [4] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.
ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [5] 蒋书运, 卫海岗, 沈祖培. 飞轮储能技术研究的发展现状[J]. 太阳能学报, 2000, 21(4): 427-433.
JIANG Shuyun, WEI Haigang, SHEN Zupei. The situation of the flywheel energy storage research[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2000, 21(4): 427-433.
- [6] 卫海岗, 戴兴建, 张龙, 等. 飞轮储能技术研究新动态[J]. 太阳能学报, 2002, 23(6): 748-753.
WEI Haigang, DAI Xingjian, ZHANG Long, et al. Recent advances in flywheel energy storage system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2002, 23(6): 748-753.
- [7] 黄宇淇, 姜新建, 邱阿瑞. 飞轮储能能量回馈控制方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(7): 1085-1088.
HUANG Yuqi, JIANG Xinjian, QIU Arui. Energy feedback control for flywheel energy storage system[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(7): 1085-1088.
- [8] MENG Yongmin, LI Tiejai, WANG Li. Simulation of controlling methods to flywheel energy storage on charge section[C] // The Third International Conference on Electric Utility DRPT, Nanjing, 2008.
- [9] 蒙永民, 李铁才, 荀尚峰. 飞轮储能分布式电能控制技术放电部分的仿真研究[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 60-64.
MENG Yongmin, LI Tiejai, XUN Shangfeng. Simulation of discharging section in flywheel energy storage using distributed electric energy control technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 60-64.
- [10] 陈定宙. 飞轮储能电池电力电子转换控制系统的研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
CHEN Dingzhou. Research on flywheel storage battery electric and electronic conversion control system[D]. Nanjing: Hohai University, 2004.
- [11] HOIMOJA H, VINNIKOV D, ROSIN A. Control basics of a flywheel-powered uninterruptible motor drive[C] // International Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, 2008.
- [12] KENNY B H, KASCAK P E, JANSEN R, et al. Control of a high-speed flywheel system for energy storage in space applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2005, 41(4): 1029-1039.
- [13] 阮军鹏. 飞轮储能技术应用于风力发电系统的基础研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
RUAN Junpeng. Preliminary study on flywheel storage technique application in wind power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [14] 徐科. 变速永磁同步风力发电机交直流并网系统运行控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
XU Ke. Study on operation control of variable speed and permanent magnet synchronous wind generator AC/DC grid-connected system[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.

收稿日期: 2015-10-15

作者简介:

冯奕(1987-), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为飞轮储能与微网控制; E-mail: fengyi@njit.edu.cn

颜建虎(1983-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为永磁电机驱动。E-mail: yanjianhu@njjust.edu.cn

(编辑 周金梅)