

DOI: 10.7667/PSPC152267

受端多端的混合直流系统输送风电的控制策略研究

葛廷利, 宁博扬, 陈金辉

(国网冀北电力有限公司技能培训中心, 河北 保定 071051)

摘要: 目前大规模风电场均采用风火打捆直流孤岛外送的输送方式, 而对于没有风火打捆条件的风场, 特别是海上风电场, 采用风火打捆方式输送风电将会大大增加投资, 甚至是不可行的。考虑到晶闸管器件在整流侧的优点以及在逆变侧容易发生换相失败故障, 结合 IGBT 的全控特性, 提出了受端多端的混合直流系统输送风电的控制策略。该策略整流侧采用传统直流器件, 逆变侧采用 VSC 器件, 根据两者之间的特性, 给出了拓扑图和控制流程图, 提出了主从控制方式。该策略既充分利用了整流侧传统器件的容量, 也利用了 VSC 的可控特性, 从而实现将波动的风电输送至负荷中心。某实际风电场的规模数据搭建了仿真模型, 并对仿真结果进行分析。仿真结果验证所提策略的有效性。

关键词: 多端直流; 主从控制; 风力发电; 混合直流; 柔性直流

Research on control strategy of received multiterminal DC system transporting mixed by the wind

GE Tingli, NING Boyang, CHEN Jinhui

(Skill Training Center, State Grid JIBEI Electric Power Company, Baoding 071051, China)

Abstract: For the current large-scale wind farm, wind & fire bundled DC silos are used for delivery of transportation methods, but for no wind, fire, wind farm baling conditions, especially offshore wind farms, using wind, fire, transport bundling approach will greatly increase investment in wind power, or even feasible. Considering the advantages of thyristor rectifier device side and the inverter side commutation failure-prone fault, combined with full-controlled IGBT characteristics, this paper proposes a control strategy of received multiterminal DC system transporting mixed by the wind. The strategy uses the conventional DC rectifier device, and the inverter side uses VSC device, according to the two characteristics, the paper gives the topology and control flow chart and proposes master-slave control strategy. This strategy not only makes full use of the traditional rectifier device capacity, but also adopts the controllable characteristics of VSC, so as to realize the fluctuation of wind power delivered to the load center. A simulation model is built by using the actual size of the data of a wind farm, and the simulation results are analyzed. Simulation results verify the validity of the strategy.

Key words: multi-terminal HVDC; master-slave control; wind power system; hybrid DC; VSC

0 引言

随着新能源的迅速发展, 风力发电已成为当下学者的研究重点^[1-3]。通常靠近负荷中心并且规模小的风电场采取就地消纳措施, 直接并入当地电网。远离负荷中心并且风电可开采量大的风电场, 则需要进行远距离输送, 包括交流输电网和直流输电网。对于超远距离的大规模风电场, 通常采用直流输电方式, 例如我国已建成投入运行的哈密-郑州直流线路^[4-7]。

风电场的功率具有随机性, 因此风电场侧配比相应比例的火电厂打捆输送已成为成熟的方案。但对于远离煤矿基地的风电场, 此方案无疑增加了投资^[8-9]。目前针对远离煤矿基地的风电场以及海上风

电场的输送方案正在成为当下的研究热点^[10]。采用常规器件的直流逆变侧容易发生换相失败故障; 采用可关断全控性器件的柔性直流受制于其容量和耐压水平, 并不适合输送大规模的风电。有学者提出了混合直流方案, 整流侧采用半控性器件的传统直流, 逆变侧采用 VSC, 并给出了拓扑图和控制策略^[11-14]。此方案由于逆变侧只有一条 VSC, 因此会限制输送容量。基于以上问题, 本文提出了受端多端的混合直流系统输送风电的控制策略。

考虑到以上问题, 本文提出了一种受端多端的混合直流系统输送方案分析。在本方案中, 送端系统采用传统直流换流器, 提供足够的输电容量和电压等级; 受端的逆变器则采用多个柔性直流并联。此方案

受端的多个柔性直流逆变器既可以作为分流通道，又可以利用柔性直流的可控性。拓扑结构如图 1 所示。

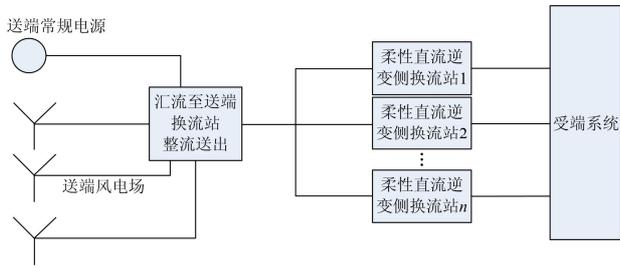


图 1 受端多端混合直流系统拓扑图

Fig. 1 Received multiterminal hybrid DC system topology diagram

图 1 中送端系统中的送端常规电源仅作为系统启动，不作为配比风电功率波动。受端换流站可以由多条 VSC 并联分流，此时需要有且只有一条 VSC 作为电压参考点，其他 VSC 采用定功率控制。

1 受端多端系统的控制策略分析

采用混合多端直流输送风电，送端输出的功率不再是以往火电等常规机组输出的功率，而仅仅是风电场的风电。混合多端直流系统的拓扑图如图 1 所示。为有效的阐述，本文将受端三端进行简单的编号：编号 1，编号 2，编号 3。

1.1 多端控制策略

将受端多端通道进行分类，选出电压通道和功率通道。图 2 为某风电场典型日功率示意图。

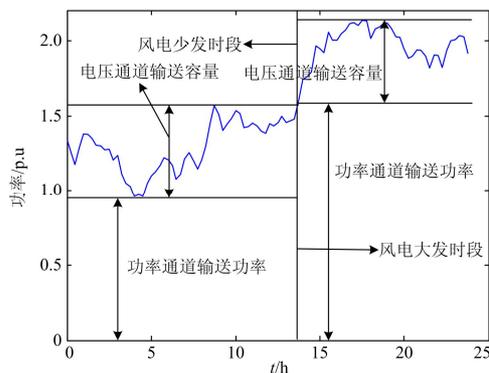


图 2 某风电场典型日功率示意图

Fig. 2 Typical daily power of a wind farm diagram

所谓电压通道，是指在受端直流侧提供电压支撑的通道，该通道的逆变器需要采用定电压控制，控制受端直流侧电压不变；由于电压通道需要保证受端侧直流电压不变，因此有且只有一个电压通道，否则会导致受端直流侧的电压不固定，各通道之间具有较大的环流。功率通道是指：除了电压通道以外的通道，该类通道所承担的功能为输送固定的功

率，可以有多个。通道功能的选择通过控制方式甄别，电压通道的控制方式为定直流电压控制；功率通道的控制方式为定功率控制方式。

图 2 所示的风电少发时段和大发时段，根据一天内风电场功率的大小来定。由于风电场的风速具有一定的周期性、季节性等因素，因此可以根据某风电场的历史风速、风电场规模等找出该风电场的少发时段和大发时段。

不论是在风电少发时段或者大发时段，均将风电场的功率分为两部分。第一部分为电压通道的输送容量，以该时段的风电场最大出力 and 最小出力之差来定；但是该容量要小于电压通道的最大输出容量，编号 1 的逆变器定为电压通道。第二部分为功率通道的输送容量，此部分功率为一定值功率，由功率通道均分该部分功率，编号 2、3 作为功率通道。

1.2 平抑风电波动的策略

从图中可以看出，在少发时段，每个功率通道输送的容量均小于该通道的额定输出容量，但输出值为一定值，故采用定功率控制，可直接输送至受端网络，其电能质量也较好。而电压通道编号 1 输出的功率则是波动值，随风速的变化波动；若直接将编号 1 接入受端网络，则对受端交流系统产生电压和频率的波动。因此该通道的电能质量较差，对受端网络的影响较大。

为消除电压通道电能质量较差的影响，建议该通道的落点位于受端交流系统调频特性较好的火电机组旁。理由如下：风电场的输出的功率具有一定的波动性，因此若想利用风电场输出的功率，则必然需要配备一定的火电机组平抑风电场的功率波动。火电机组的落点可以选择送端孤岛系统，采用风火打捆外送。火电机组也可以落在受端系统，风电场输送波动的风电功率至负荷中心，即受端系统的电压通道输送的功率。此时负荷中心的频率会有波动，而系统内的调频机组平抑此波动。因此电压通道的落点放在调频特性较好的火电机组旁，可以利用快速调节火电机组的出力，平抑风电场的功率波动，提高电能质量。

因此本文提出的控制策略，实际是利用受端交流系统已经建成的火电机组平抑风电场功率波动。相较在送端孤岛系统新建火电等常规机组，此方案无疑具有很好的经济性。

目前国内外受制于多条 VSC 之间的问题主要集中在：1) 多条 VSC 的拓扑连接(并联或者多端)；2) 各 VSC 输送的容量不同导致的环流问题；3) VSC 侧的电压支撑问题。问题 1)上文已经给出了一种拓扑结构图。问题 3)则会随着 VSC 器件在容量、耐压上

进一步发展, 得到更好的解决。针对问题 2), 本文 VSC 侧采用主从控制方式。该控制方式可以解决各 VSC 通道的输送容量, 虽无法完全消除环流, 但可以将环流引起的电压、功率控制在可控范围之内。

2 主从控制方式

以图 1 中的三端多通道为例, 设计系统控制方式。多端直流常用的控制方式包括电压下降控制方式和主从控制方式。本文采用主从控制方式。

采用主从式控制方法的多端系统, 通常需要设置上层控制器。上层控制器采集到各换流器的电流值(或功率值)并计算出这些数值的代数和, 然后根据特定的控制要求或优化方案按一定的比例分配给各换流器(包括主换流器)作为运行参考设定值。

采用该运行方式必须具有上层控制器并具备一定的通信能力。对于多换流器系统而言, 为了保持系统协调稳定运行, 需要上层控制器的快速协调控制, 但对于远距离传输系统, 高速通信要求往往难以达到要求。因此必需采用高速本地控制。如果满足高速通信要求, 可采用统一控制方式。若只满足相对缓慢的通信, 则宜采用裕度控制方式。

送端输送风电场功率时, 根据风电场功率特性, 仅由送端系统发送每天内的风电少发时段和大发时段, 以及对应的风电场功率水平即可。因此不需要频繁的两端通信。此时由上层控制器控制本侧系统的稳定运行即可。本文采取的主从控制方式中的统一控制方式。图 3 所示为上层控制器的示意图。

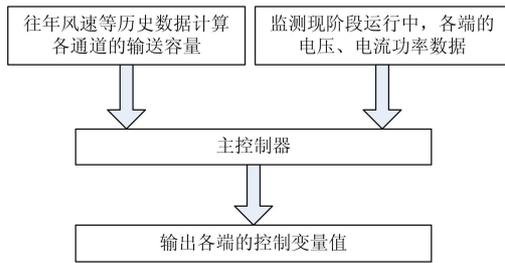


图 3 上层控制器逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of upper controller

功率通道功率定值变换:

即使受端系统处于风电少发阶段或者风电多发阶段, 电压通道输出的容量仍然可能超出该通道的最大输出功率值。因此主控制器需要改变功率通道的输出功率定值。其逻辑图如图 4 所示。

图 4 中, I_{f1} 、 I_{f2} 、 I_{f3} 分别对应编号 1、2、3 的三个功率通道的检测电流, 编号 1 对应电压通道, 编号 2、3 对应功率通道。 K_1 、 K_2 、 K_3 为一常数, 对电流处理。为确保每个通道输出的功率不超过允

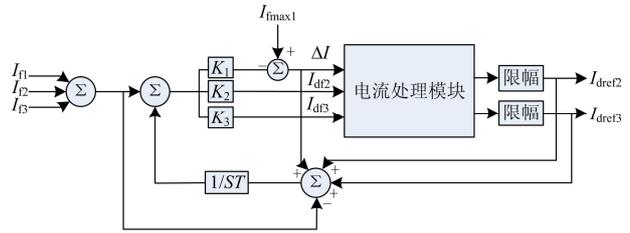


图 4 主控制器的逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of the main controller

许容量, 2、3 功率通道的电流需要限幅环节, 电压通道 1 的电流则需要进行比较处理。图中电流处理模块即为解决该问题。

$$I_m = I_{f \max 1} - I'_{f1} \quad (1)$$

$$I_f = I_{f \max 1} - I''_{f1} \quad (2)$$

若 $\Delta I < I_m$

$$\begin{cases} I_{dr2} = I_{dr2} + \Delta I_d \\ I_{dr3} = I_{dr3} + \Delta I_d \end{cases} \quad (3)$$

若 $\Delta I > I_f$

$$\begin{cases} I_{dr2} = I_{dr2} - \Delta I_d \\ I_{dr3} = I_{dr3} - \Delta I_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_{f \max 1}$ 为电压通道允许输出容量对应的电流值; I_{f1} 为电压通道的电流监测值; I'_{f1} 为电压通道运行电流上限值; 同理 I''_{f1} 为电压通道运行电流下限值; I_m 为电流上限调整比较值; I_f 为电流下限调整比较值。

式(1)、式(2)给出了电流上限、下限调整比较值。当电压通道的电流检测值 I_{f1} 接近该通道输送功率的上下限值时, 此时需要改变功率通道 2、3 的电流定值。式(3)、式(4)给出了电流通道 2、3 电流定值的改变方案。

选取 I'_{f1} 、 I''_{f1} 作为电压通道运行电流的限值, 是考虑到电压通道电流处于两者之间, 通道输送容量未达到限值, 此时调整功率通道的输送容量, 可以减缓系统的暂态过程, 提高系统的稳定性。同时, 上层控制器在调整功率通道的电流定值时, 也需要逐个调整, 而非同时调整。若同时调整, 则可能功率通道都处于暂态过程, 影响系统的暂态稳定性。

3 算例分析

为验证所提出策略的有效性, 为验证所设计的控制器的有效性, 对图 1 中采用分散接线方式的三端输电系统进行仿真。利用 Matlab/Simulink 搭建了模型。模型参数如下。

送端系统: 送端交流侧出口电压为 6.5 kV, 升压至 220 kV 汇流至换流站, 额定频率为 1 000 MW, 直

流线路额定电压为500 kV,直流传输线路长750 km。

逆变侧系统: 主要包括两个换流站, 编号1和2。1号换流站设为电压通道, 2号换流站设为电流通道, 连接至负荷中心。系统初始稳态工作参数: 换流器的直流电压参考值为500 kV, 功率参考值为500 MW。

3.1 送端通道特性分析

图5为送端整流侧的参数图。此换流站输送变化的风电功率。图中 I_d 为该站的实际运行的电流值; I_{dref} 为给定风电场功率波动的电流值; V_{d1} 为送端直流电压; V_{d2} 为逆变侧电压值; 为 P_{dc} 送端输送的直流功率。

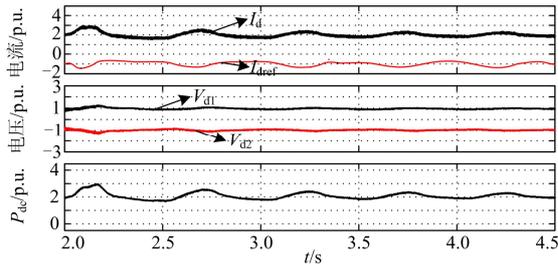


图5 送端参数图

Fig. 5 Parameter of the end of the feed

从图5中可以看出, 直流运行电流 I_d 随着给定的风电场功率波动电流值 I_{dref} 波动, 几乎吻合; 送端直流运行电压 V_{d1} 与逆变侧的运行电压基本一致; 输送一波动的风电场功率波动。与前文所分析的该通道输送变化的功率相吻合。

3.2 功率通道特性分析

图6为1号换流站电压通道的参数图。本换流站逆变侧采用定电压控制。图中 I_d 为电压通道的直流电流值; V_{dref} 为定电压控制的电压定值; V_{dc} 为实际运行中的电压值; P_{dc} 为流经通道的直流功率。

从图6可以看出, 该通道电流为一波动值, 输送波动的功率。系统侧运行电压 V_{dc} 基本控制在定值 V_{dref} 附近, 但并不完全吻合, 而是随着电流的波动而上下波动。与前文分析的该通道输送变化的功率相吻合。

电压通道直流运行电压变化分析: 1号换流站采用定电压控制, 理论上其运行的电压应该为电压定值, 并保持不变。但从上述结果可以看出, 其电压为波动值。由于逆变侧1号与2号换流站并联运行, 并且两个换流站通道输送的功率可能会不同, 即直流电流值不同, 因此会在两个换流站之间产生一个环流。该环流导致了两个换流站之间的电压会有压差, 因此电压会产生波动, 造成此现象。

3.3 功率通道特性分析

图7为2号换流站功率通道的参数图。本换流

站逆变侧采用定电流控制。图中 I_{dref} 为定电流控制的电流整定值; I_d 为该通道实际运行的电流值; V_{dc} 为实际运行中的电压值; P_{dc} 为流经通道的直流功率。

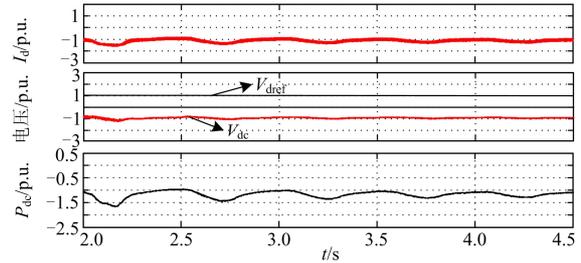


图6 电压通道参数图

Fig. 6 Parameter of voltage channel

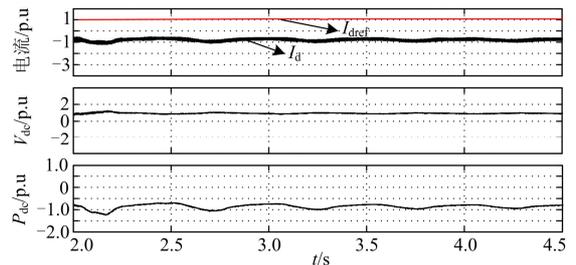


图7 功率通道参数图

Fig. 7 Parameter of power channel

从图7可以看出, 该通道电流值与定值基本吻合, 但不完全一样, 其波动幅度比电压通道的电流波动值小。系统侧运行电压 V_{dc} 与电压通道的运行电压一致。输送的功率在定值上下波动, 可以看作是基本稳定的功率。与前文分析的该通道输送变化的功率相吻合。

功率通道直流运行电流变化分析: 2号换流站采用定电流控制, 理论上其运行的电流应该为电流定值, 并保持不变。但从上述结果可以看出, 其电流为波动值。同理, 由于1号与2号换流站之间环流的存在, 并且在此过程中直流电压也不是一个定值, 因此输送的功率也不可能为固定值。该通道的电流变化由于环流引起, 而非由于送端风电场功率的波动导致。但从图中可以看出, 电压通道的直流电压波动, 但基本稳定在定值附近; 电压通道的电流值比功率通道的电流值波动较大。风电场的波动功率主要由电压通道输出, 功率通道起到功率平衡的目的。

4 结论

本文首先提出混合多端系统的拓扑图, 并分析了该拓扑结构下的控制策略以及对应的控制方式。该控制策略将受端多个VSC分为电压通道(有且仅

有 1 条)和功率通道。多个 VSC 通道之间采用主从控制方式, 协调不同通道之间的电压、功率平衡问题。针对本章节提出的控制策略和控制方式, 采用 Matlab/Simulink 搭建模型, 仿真分析结果。通过结果的分析, 验证了混合多端直流输送风电的可行性。

参考文献

- [1] 赵庆波. 国家电网促进清洁能源发展[J]. 电力技术经济, 2009, 21(5): 1-4.
ZHAO Qingbo. State Grid contributes to the development of clean energy[J]. Electric Power Technologic Economics, 2009, 21(5): 1-4.
- [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] 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.
- [4] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-67.
LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61-67.
- [5] 丁茂生, 王辉, 舒兵成, 等. 含风电场的多直流送出电网电磁暂态仿真建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 63-70.
DING Maosheng, WANG Hui, SHU Bingcheng, et al. Electromagnetic transient simulation model of multi-send HVDC system with wind plants[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 63-70.
- [6] 关洪杰, 张锋, 孙谊娟, 等. 哈郑直流工程投运初期对新疆电网影响分析[J]. 中国电力, 2012, 45(12): 48-51.
GUAN Hongjie, ZHANG Feng, SUN Yiqian, et al. Analysis on the impact of Hami-Zhengzhou ultra-high voltage DC project on the power grid[J]. Electric Power, 2012, 45(12): 48-51.
- [7] 肖创英, 汪宁渤, 陟晶, 等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统及其自动化, 2010, 34(17): 64-68.
XIAO Chuangying, WANG Ningbo, ZHI Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 64-68.
- [8] 边晓燕, 耿艳, 李学武, 等. 风电并网系统小干扰概率稳定性分析与改善[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 1-7.
BIAN Xiaoyan, GENG Yan, LI Xuewu, et al. Probabilistic small-signal stability analysis and improvement of power system with wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 1-7.
- [9] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-31.
SHAO Yao, TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-31.
- [10] 鲍洁秋, 梦垂懿. VSC-HVDC 系统在海上风电传输中的应用[J]. 沈阳工程学院学报, 2011, 7(1): 5-9.
BAO Jieqiu, MENG Chuiyi. Application of VSC-HVDC system on offshore wind farm[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering, 2011, 7(1): 5-9.
- [11] 张宁, 康重庆, 周宇田, 等. 风电与常规电源联合外送的受端可信容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 71-80.
ZHANG Ning, KANG Chongqing, ZHOU Yutian, et al. Evaluation of receiving-end credible capacity for joint delivery of wind power and conventional electricity generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 71-80.
- [12] 陈霞, 林卫星, 孙海顺, 等. 基于多端直流输电的风电并网技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 60-67.
CHEN Xia, LIN Weixing, SUN Haishun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 60-67.
- [13] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 基于 CSC 和 VSC 的混合多端直流输电系统及其仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 32-36.
YUAN Xufeng, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Simulation study for a hybrid multi-terminal HVDC system based on VSC and CSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 32-36.
- [14] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-19.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-19.

收稿日期: 2015-12-31; 修回日期: 2016-05-09

作者简介:

葛廷利(1979-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为高压直流输电和风力发电; E-mail: gtl153326@163.com

宁博扬(1988-), 男, 学士, 培训师, 研究方向为新能源并网; E-mail: nby839@163.com

陈金辉(1980-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为基于 ARM 和 DSP 的新能源控制技术。E-mail: 515246362@qq.com

(编辑 周金梅)