

国家风光储示范电站黑启动中风机启动失败原因及对策分析

胡应宏^{1,2}, 余志森^{1,2}, 邓春^{1,2}, 王劲松^{1,2}, 李雨^{1,2}

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045; 2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

摘要: 对风光储电站黑启动的试验过程中风机并网过程进行了分析。首先, 重点分析了风机启动造成储能变流器跳闸的原因, 并对风机参与黑启动的过程进行了仿真验证, 指出由于风机缺少恰当的软启动过程, 导致启动过电流, 使得黑启动失败; 然后, 提出了风机参与黑启动过程中直流电压软启动的控制策略; 最后, 通过仿真对所提控制策略进行了验证, 表明所提方法能够很好地避免风机变流器的启动过电流问题。

关键词: 黑启动; 永磁直驱风机; 风光储电站; 储能变流器; 风电; 并网; 软启动

中图分类号: TM 315; TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.008

0 引言

风光储电站地处偏远, 一旦外部电网发生故障, 将对电站内的正常安全生产和日常生活造成极大影响^[1-2]。大停电后的有效恢复控制是减小停电损失的重要措施, 根据恢复过程中不同时期的任务, 通常分为黑启动、网架重构和负荷恢复 3 个阶段^[3-6]。传统的黑启动主要依靠水电机组或抽水蓄能机组作为电源进行启动^[7-10]。文献^[10-14]进行了黑启动的策略评价研究及在线决策等。文献^[15-17]对含风机、光伏等新能源分布式电源及智能配电的黑启动及相关控制策略进行了理论研究。风光储电站由于包含大规模的储能设备、双向变流设备和较为完备的功率控制系统, 能够为电站黑启动提供基础。目前国内外研究成果中尚未有利用风光储电站进行黑启动的工程研究和试验工作, 相关的研究也未见报道。风光储示范电站具备黑启动能力对风光储公司、冀北电力公司乃至国家电网公司都具有重要意义。对于风光储公司而言, 风光储电站具备黑启动能力将极大提高安全稳定运行能力; 对于冀北电力公司而言, 风光储电站将为冀北电网提供潜在的黑启动可能性; 对于国家电网公司而言, 风光储电站的黑启动能力将具有良好的示范作用, 使储能电站具备特殊情况下支撑电网安全稳定运行的作用。同时, 风光储电站黑启动的研究和实现, 将为新能源、局部微电网实现特殊方式下的运行提供工程示范。

本文首先对风机参与风光储电站黑启动的过程进行了分析, 重点分析了风机启动造成储能变流器跳闸的过程, 并对风机参与黑启动的过程进行了仿真验证, 指出由于风机缺少恰当的软启动过程, 导致启动过流, 使得黑启动失败; 然后, 提出了风机软启

动的控制策略, 并利用仿真方法对提出的控制策略进行了验证, 表明提出的方法能够很好地避免风机变流器的启动过流问题。

1 永磁直驱风机及其启动过程

1.1 永磁直驱风机拓扑结构

永磁直驱风机的拓扑如图 1 所示, 其由六相的永磁电机、二极管整流器、斩波升压电路、直流电容、制动电路以及变流器组成。发电机发出的交流电经二极管整流器, 变为较低的直流电压, 该直流电压经斩波升压电路变为目标直流电压, 然后经变流电路变为交流电路, 每相经过 2 个桥臂输出, 增大了变流器的容量。

1.2 永磁直驱风机启动过程

某风机的预充电和配电回路如图 2 所示。在变流器运行前直流母线没有电压时, 如果合闸, 会导致很大的冲击电流。预充电回路就是在回路中串入限流电阻, 通过限流电阻为母线充电, 使得直流电压缓慢建立。主要通过断路器 1Q₃、缓冲电阻以及断路器 1Q₇, 经过变流器的二极管进行不可控整流, 它绕开了主回路断路器, 在主回路断路器吸合前先将母线充电, 以保护母线上电容不受电网电压的冲击。在充电一段时间后, 闭合主断路器, 断开缓冲电阻。620 V AC 经过供电变压器转换为 2 路 400 V AC, 一路为变流器主柜设备供电, 另一路则为机舱供电。400 V AC 主要为 400 V AC/24 V DC 开关电源, IGBT 模块柜和塔底散热风机以及控制风机的变频器, 主柜内的照明、加热、散热、维护插座, 塔架内的照明、助力器、维护插座, 主回路的储能供电。

2 风机参与黑启动试验分析

2.1 风机的启动过程

在风光储电站进行黑启动过程中的电压、电流

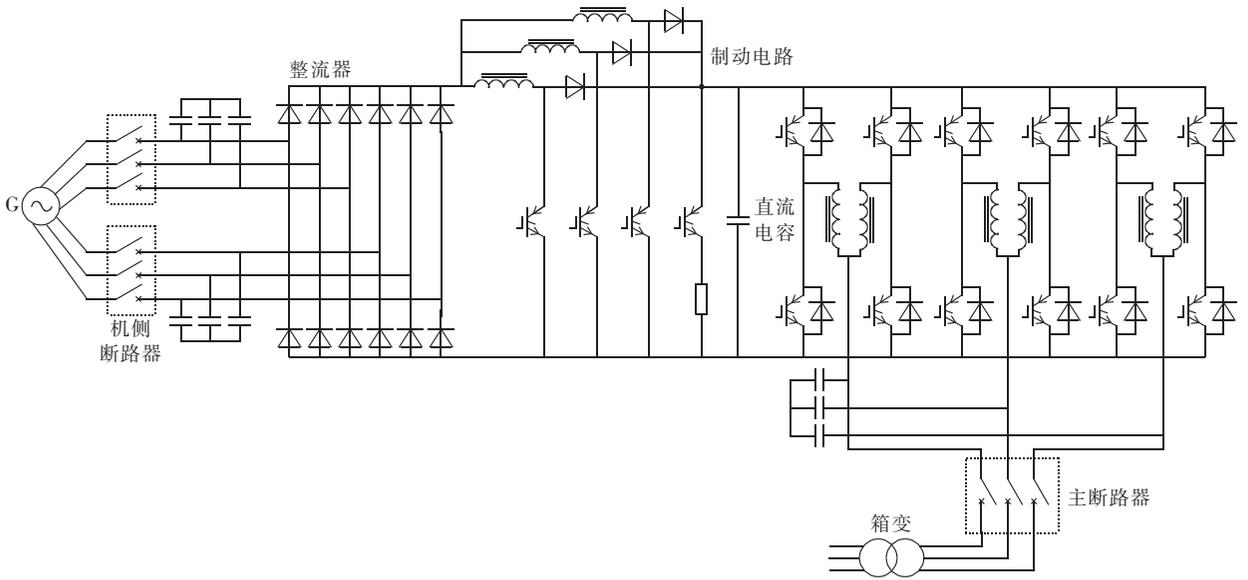


图 1 永磁直驱风机的拓扑结构

Fig.1 Topology of permanent magnetic synchronous generator

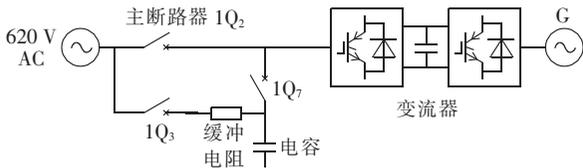


图 2 永磁直驱风机的预充电和配电回路

Fig.2 Pre-charging and power distribution circuit of permanent magnetic synchronous generator

录波如图 3 所示,风机参与黑启动的过程如下。

- a. 零启升压过程中,电流经断路器 $1Q_3$ 、缓冲电阻接电容,断路器 $1Q_7$ 处于断开状态,变流器没有接入,电流中不含谐波电流。
- b. 电压上升到变流器设置工作下限时, $1Q_7$ 闭合,对变流器通过二极管不可控整流对直流电容充

电。由于 $1Q_7$ 闭合,滤波电容上电压突然升高,导致无功电流突然变大,使得机端电压也有个跳变,具体波形如图 3 中椭圆部分所示。

该过程中的电流为容性电流叠加充电时的冲击电流,由于不可控整流的谐波含量非常丰富,使得电流畸变比较严重,随着系统电压升高,充电电流变大,导致系统电压畸变,电流放大后的波形如图 4 所示。有功功率主要为线路损耗,其值很小,约为 10 kW。

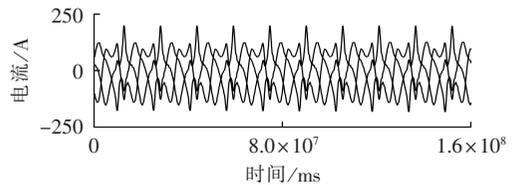


图 4 变流器接入后的电流波形

Fig.4 Current waveform after converter is connected

c. 中间电压变化是由于投电加热等负荷,导致电压降低、谐波电流变小。系统稳定后,电压恢复,谐波电流也恢复为稳态值。

d. 并网过程中,由于由不可控整流到可控整流没有软启动过程,导致冲击电流过大,使得储能变流器过流,从而跳闸。

2.2 风机的跳闸过程及原因分析

并网跳闸电流波形在可控整流之前,主要是无功电流,为了建立直流电压,需要吸收有功,所以在变为可控整流时,主要为有功电流,具体录波波形如图 5 所示,从波形可以看出可控整流前后相位的变化。

建立直流电压过程中,如果没有适当的软启动过程,就会由于直流电压建立过程太快造成较大的启动电流。为了抑制过大的启动电流,要进行软启

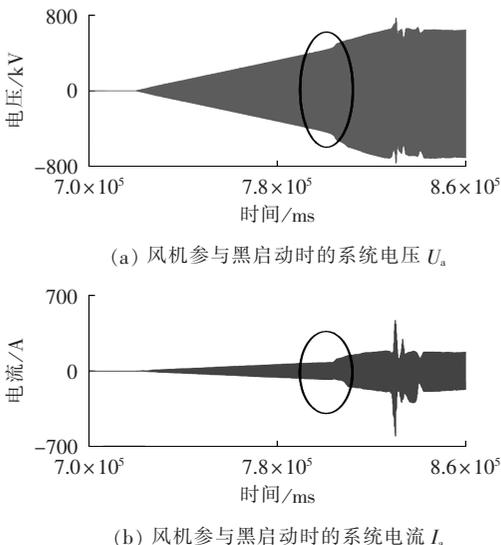


图 3 永磁直驱风机参与黑启动时的电压与电流
Fig.3 Voltage and current of permanent magnetic synchronous generator during black-start

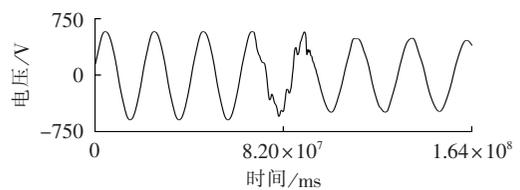
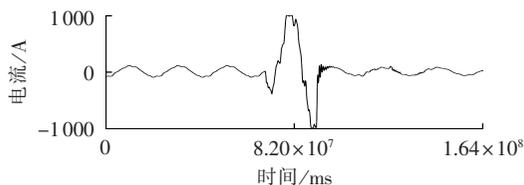
(a) 风机跳闸时的系统电压 U_a (b) 风机跳闸时的系统电流 I_a

图 5 风机跳闸时的系统电压、电流波形

Fig.5 Voltage and current waveforms when wind turbine is tripped

或者适当增大软启动的启动时间长度。与风机在黑启动过程中跳闸仿真过程一致,表明所分析的跳闸原因符合现场现象。

3 风机参与黑启动的仿真分析与改进措施

3.1 仿真分析

为了验证分析的正确性,对风机参与黑启动过程在 RT-Lab 进行硬件在环仿真,系统未进行分核,仿真时间步长为 8×10^{-5} s,硬件为基于合作厂家某风科技的硬件平台进行,基于其 DSP+FPGA 来实现算法。仿真系统为单机无穷大系统,系统电压为 690 V,风机为永磁直驱风机,容量为 $2 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。在 22 s 时刻,风机端电压满足启动条件,合闸启动,但是在启动瞬间,由于缺少软启动过程,导致 VF 电源过流跳闸,得到的仿真波形如图 6 所示。

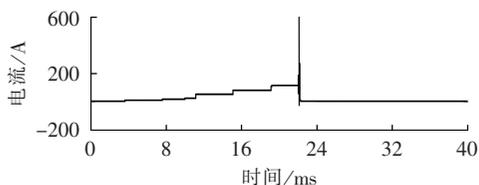


图 6 风机参与黑启动的仿真波形

Fig.6 Simulative waveform of black-start with wind turbine

3.2 风机软启的改进措施

3.2.1 已有的直流电压软启策略

风机已有的直流电压软启动过程,其软启动示意图如图 7 所示,建立方法为逐步提高目标电压值,使得在软启过程中流入变流器的电流均较小,避免冲击电流。但该措施无法避免由于控制器初始化等造成的过流,故需要对策略进行修改。

3.2.2 控制器初始化参数造成的冲击

针对控制器参与以及初始化等造成的冲击电

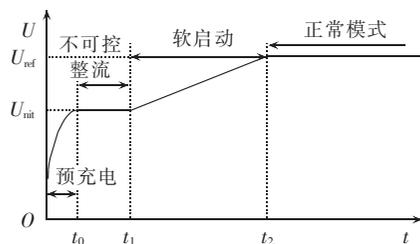


图 7 直流电压软启动过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of DC-voltage soft-startup

流,将启动的初始电压设置为低于可控整流电压,使得电流先流入系统,然后逐渐升高目标电压,由流入系统转为流入变流器,避免初始时刻的过冲。软启动初始时刻示意图如图 8 所示。

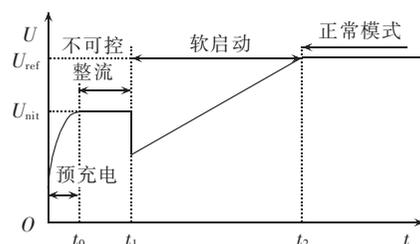
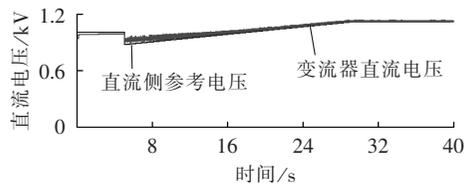


图 8 软启动初始时刻示意图

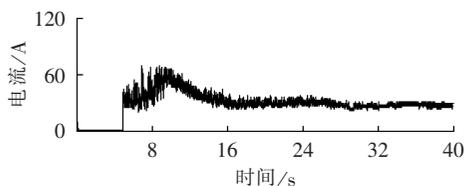
Fig.8 Schematic diagram of starting process of soft-startup

3.2.3 改进措施的仿真验证

对提出的直流侧电压软启的策略进行仿真验证,仿真条件同 3.1 节,修改直流电压参考值,得到的仿真波形如图 9 所示,其中图 9(a)为修改后的直流侧参考电压以及变流器直流电压,从图中可以看出,直流电压从低于整流电压值逐渐增大;图 9(b)为 a 相电流,从图中可以看出该过程没有冲击电流,直流电压也没有异常,很好地实现了变流器的软启动。



(a) 直流侧参考电压以及变流器直流电压



(b) 改进策略的 a 相电流

图 9 风机软启动过程中的仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of wind turbine during soft-startup

4 结论

本文对永磁直驱风机参与风光储电站的黑启动过程进行了分析,风机变流器直流侧电压缺少软启动过程导致风机启动失败,提出了风机参与黑启动过程的修改方法,并对方法进行了仿真验证,主要结论如下:

a. 对试验过程进行了分析,指出风机在黑启动过程中存在启动冲击电流的问题,需要进一步对风机的启动过程进行优化;

b. 提出了风机软启动的控制策略,将直流母线的目标电压设置为低于整流电压值,然后再逐渐提高直流母线的目标电压,避免了风机启动过程中的冲击电流,解决了风机的软启动过流问题。

参考文献:

- [1] 石立宝,史中英,姚良忠,等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术,2010,34(3):48-54.
SHI Libao,SHI Zhongying,YAO Liangzhong,et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology,2010,34(3):48-54.
- [2] 毛安家,张戈立,吕跃春,等. 2011年9月8日美墨大停电事故的分析及其对我国电力调度运行管理的启示[J]. 电网技术,2012,36(4):74-78.
MAO Anjia,ZHANG Geli,LÜ Yuechun,et al. Analysis on large-scale blackout occurred in South America and North Mexico interconnected power grid on Sept. 8,2011 and lessons for electric power dispatching in China[J]. Power System Technology,2012,36(4):74-78.
- [3] 孙磊,张臻,林振智,等. 计及电动汽车充电站作为黑启动电源的网架重构优化策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):75-81.
SUN Lei,ZHANG Can,LIN Zhenzhi,et al. An optimization strategy for network reconfiguration with charging stations of electric vehicles as black-start power sources[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(14):75-81.
- [4] 梁海平,顾雪平. 基于谱聚类的黑启动子系统划分[J]. 电网技术,2013,37(2):372-377.
LIANG Haiping,GU Xueping. Black-start network partitioning based on spectral clustering[J]. Power System Technology,2013,37(2):372-377.
- [5] 朱冬雪,顾雪平,钟慧荣. 电力系统大停电后机组恢复的多目标优化方法[J]. 电网技术,2013,37(3):814-820.
ZHU Dongxue,GU Xueping,ZHONG Huirong. A multi-objective optimization method for post-blackout unit restoration[J]. Power System Technology,2013,37(3):814-820.
- [6] 刘映尚,吴文传,冯永青,等. 黑启动过程中的负荷恢复[J]. 电网技术,2007,31(13):17-22.
LIU Yingshang,WU Wenchuan,FENG Yongqing,et al. Load recovery during power system blackstart[J]. Power System Technology,2007,31(13):17-22.
- [7] 林济铿,么莉,孟宪朋,等. 天津电网黑启动试验研究[J]. 电网技术,2008,32(5):55-58.
LIN Jikeng,YAO Li,MENG Xianpeng,et al. Test research of black start of Tianjin Power Grid[J]. Power System Technology,2008,32(5):55-58.
- [8] 逯怀东,郭志红,王辉,等. 基于500kV网架的电网黑启动试验分析[J]. 电网技术,2013,37(7):1895-1901.
LU Huaidong,GU Zhihong,WANG Hui,et al. Power system black-start analysis based on 500kV power grid[J]. Power System Technology,2013,37(7):1895-1901.
- [9] 周世平. 湖北电网黑启动试验的实施与思考[J]. 高电压技术,2007,33(12):115-117.
ZHOU Shiping. Practice and discuss of black start test for Hubei Electric Power Network[J]. High Voltage Engineering,2007,33(12):115-117.
- [10] 阮前途,王伟,黄玉,等. 基于燃机机组的上海电网黑启动系列试验[J]. 电网技术,2006,30(2):19-22.
RUAN Qiantu,WANG Wei,HUANG Yu,et al. A series of blackstart tests based on gas turbine generators in Shanghai Power Grid[J]. Power System Technology,2006,30(2):19-22.
- [11] 王大江,顾雪平,贾京华. 一种扩展黑启动方案恢复效果的评估方法[J]. 电网技术,2014,38(12):3360-3365.
WANG Dajiang,GU Xueping,JIA Jinghua. A method to access restoration effect of extended black-start scheme[J]. Power System Technology,2014,38(12):3360-3365.
- [12] 赵达维,刘天琪,李兴源. 基于保险理论的黑启动辅助服务定价方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):85-91.
ZHAO Dawei,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Insurance theory based pricing method for black-start ancillary service[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(13):85-91.
- [13] 赵达维,刘天琪,李兴源. 电力系统恢复控制在线决策方法[J]. 电网技术,2013,37(10):2761-2770.
ZHAO Dawei,LIU Tianqi,LI Xingyuan. An on-line decision-making method applicable to power system restoration control[J]. Power System Technology,2013,37(10):2761-2770.
- [14] 林济铿,李童飞,赵子明,等. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估[J]. 电网技术,2012,36(2):115-120.
LIN Jikeng,LI Tongfei,ZHAO Ziming,et al. Assessment on power system black-start schemes based on entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Power System Technology,2012,36(2):115-120.
- [15] 赵冬梅,张楠,刘燕华,等. 基于储能的微网并网和孤岛运行模式平滑切换综合控制策略[J]. 电网技术,2013,37(2):301-306.
ZHAO Dongmei,ZHANG Nan,LIU Yanhua,et al. Synthetical control strategy for smooth switching between grid-connected and islanded operation modes of microgrid based on energy storage system[J]. Power System Technology,2013,37(2):301-306.
- [16] 李辉,胡姚刚,李洋,等. 大功率并网风电机组状态监测与故障诊断研究综述[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):6-16.
LI Hui,HU Yaogang,LI Yang,et al. Overview of condition monitoring and fault diagnosis for grid-connected high-power wind turbine unit[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(1):6-16.
- [17] 李升,卫志农,孙国强,等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定分岔研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):17-23.
LI Sheng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Voltage stability

[18] 林伟芳, 汤涌, 郭小江. 多馈入交直流系统短路比影响因素分析[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 64-68.

LIN Weifang, TANG Yong, GUO Xiaojiang. Analysis of influencing factors of short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 64-68.

作者简介:

周红婷(1990—), 山东莱芜人, 硕士研究生, 研究方向为



周红婷

电力系统稳定分析(E-mail:bleachwin2014@163.com);

谢欢(1979—), 湖南衡阳人, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析(E-mail:xiaosan_616@aliyun.com);

吴涛(1968—), 陕西西安人, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析(E-mail:mrwutao0619@sina.com)。

Analysis and simulation of wind farm dynamic behavior in high-voltage trip-off accident of Zhangbei

ZHOU Hongting¹, XIE Huan², WU Tao², SONG Wei¹, FAN Weijie³, LI Changyu², XIA Xue²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100045, China;

3. Beijing Electric Power Transmission and Transformation Company, Beijing 102401, China)

Abstract: Based on the var-voltage sensitivity analysis with the consideration of dynamic var control, the dynamic behavior of wind farms in “5.14” high-voltage cascading trip-off accident of Zhangbei and its influencing factors are analyzed in detail for different control modes of in-farm var sources, such as the constant var control of sending line, DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) and SVG (Static Var Generator). It is concluded that, the constant inductive var control of DFIG and SVG may also increase the var-voltage sensitivity of wind farm bus, depending on the initial inductive var, capacitive var and short-circuit capacity ratio of wind farms. According to “5.14” accident, the influence of capacitor disturbance on farm-side 35 kV bus voltage of a simple system is simulated and analyzed by PSS/E for different control modes and initial states of wind farms and the simulative results verify the rationality of the obtained conclusion.

Key words: wind farms; dynamic behavior; high-voltage trip-off; constant var control; var-voltage sensitivity; stability; sensitivity analysis

(上接第 53 页 continued from page 53)

bifurcation of large-scale grid-connected PV system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 17-23.

作者简介:

胡应宏(1981—), 男, 四川眉山人, 高级工程师, 博士后, 研究方向为高压直流输电、新能源并网稳定与控制(E-mail: factshu@163.com);



胡应宏

余志森(1980—), 男, 广东肇庆人, 高级工程师, 硕士, 主要从事带电作业工作;

邓春(1971—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 硕士, 主要从事高压设备诊断与测试、管理工作。

Cause of generator startup failure during black-start of national wind/photovoltaic/energy-storage pilot station and its countermeasure

HU Yinghong^{1,2}, YU Zhisen^{1,2}, DENG Chun^{1,2}, WANG Jingsong^{1,2}, LI Yu^{1,2}

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100045, China)

Abstract: The grid-connection process of wind turbine during the black-start of a wind/photovoltaic/energy-storage station is analyzed. The cause of energy-storage converter trip due to the wind turbine startup is emphatically analyzed and the black-start process with wind turbine is simulated, which verifies that, the wind turbine startup overcurrent due to the lack of proper soft-startup process results in the black-start failure. The control strategy for the soft-startup of DC voltage is proposed for the black-start with wind turbine, which is verified by simulation, showing that the startup overcurrent of wind turbine converter is effectively avoided.

Key words: black-start; permanent magnet direct-drive generator; wind/photovoltaic/energy-storage power station; energy-storage converter; wind power; grid-connection; soft-startup