

考虑风电特性的送出线路过载控制方法

陈永华^{1,2}, 唐冠军^{1,2}, 宋晓芳^{1,2}, 李雪明^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106)

摘要: 风电送出线路不满足 $N-1$ 安全约束时, 任意一条线路跳闸都会导致其他线路出现过载。针对集群式风电并网的特点, 首先分析风电机组低电压穿越(LVRT)能力、风电短时出力波动对传统过载控制方案的影响, 并提出针对性建议。在此基础上, 进一步提出考虑风电出力变化趋势的过载切机方案, 通过数值方法分析各风电场的出力变化趋势, 动态优化选择切机对象, 使得切机措施更加高效, 减小风电送出线路再次发生过载的概率, 从而保障风电外送通道的安全性。

关键词: 风力发电; 过载控制; 低电压穿越; 短时出力波动; 切机策略

0 引言

根据“十二五”规划, 中国将建设河北、蒙东、蒙西、吉林、甘肃、山东、江苏、新疆和黑龙江九大风电基地^[1], 规模开发、集中并网、远距离输送已成为国内风电开发利用的重要模式之一。然而, 风电并网量迅速增长的同时会出现电网建设与风电场建设不同步, 大量的风电需要通过原有的 110 kV/330 kV 线路汇集到 750 kV 变电站再远距离外送消纳, 而原有的 110 kV/330 kV 输电线路的外送能力严重不足, 难以满足电网运行的 $N-1$ 安全稳定约束, 任意一条线路跳闸都会导致其他线路出现严重过载, 需要部署电网安全稳定控制装置解决风电送出问题。

文献[2-5]研究指出, 不同类型和不同厂家的风电机组的运行控制方式及性能差别很大, 机组的低电压穿越(LVRT)能力、故障后功率的恢复速率也参差不齐。这些将使得外送输电线路在故障后功率恢复期间各个风电场的电气量变化存在很大差异, 可能导致稳控装置过载控制量判别不准确。文献[6]介绍了某些风电场在脱网后具备自动复位的能力, 可能导致过载控制装置切机完成后, 送出断面再次发生过载。另外, 按照传统的过载切机策略, 风电送出线路过载后, 根据过载量, 按照既定的优先级顺序选择切除风电, 直至所切风电总量不小于过载量。然而, 不同风电场所在地区的风资源情况不相同, 每

个风电场出力的波动情况并不一致, 按照传统的过载控制策略完成控制后, 若剩下的风电场出力正处于上升阶段, 有可能使得风电送出线路再次发生过载。因此, 如何准确判断过载量, 并且通过合理安排切机策略保证过载断面不反复发生过载是解决风电送出线路过载问题的关键。

文献[7-9]针对风电并网带来的暂态问题, 提出了相应的切机措施, 但过载问题是一个相对较长时间的控制问题, 与暂态切机控制明显不同。文献[10-11]分别提出了基于潮流跟踪算法和基于内点消除法的过载断面控制算法, 这些算法都能快速、精确地完成过载控制, 但算法相对复杂, 不易在过载控制装置内实现。文献[12]针对短期性或临时性电网热稳定过载问题, 提出了利用调度主站中稳态数据实现分钟级别响应的切机、切负荷方法; 文献[13]在过载控制中按照约定优先级分配切机量, 并定期对优先级轮换以兼顾各风场的公平与效益; 文献[14]中则按可切有功功率从大到小进行排序累加直至大于需切量的方法切除相应风电场, 但文献[12-14]中都未考虑风电的出力短时波动。本文针对风电并网特性, 分析风电机组 LVRT 能力、风电短时出力波动对传统过载控制方案的影响, 并提出针对性建议, 最后在此基础上提出一种考虑风电变化趋势的过载切机方案。

1 风电机组 LVRT 对过载控制的影响及对策

1.1 典型风电送出过载控制案例介绍

图 1 为风电送出系统典型主接线图, 多个风电场在升压站汇集, 通过双回线路送到更高电压等级

收稿日期: 2014-09-18; 修回日期: 2015-01-04。

国家科技支撑计划资助项目(2012BAA15G00); 国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG003-2012)。

的电站,在正常运行中双回送出线路都达到额定送出功率的 50%~70%,一旦有一回线路发生故障跳闸或者无故障跳闸都将导致另一回线路过载。为了解决这一问题,往往在风电集中送出变电站内部署安控装置作为控制主站,同时在各风电场部署安控装置作为执行站。主站用于不断检测断面信息,根据已制定好的过载判断逻辑,确定断面是否发生或者可能发生过载、确定需切除的总过载量,并按照相应逻辑下发切机命令到各风电场执行站,各风电场执行站根据所接收到的指令以及风电场采集数据执行相应的切机动作。

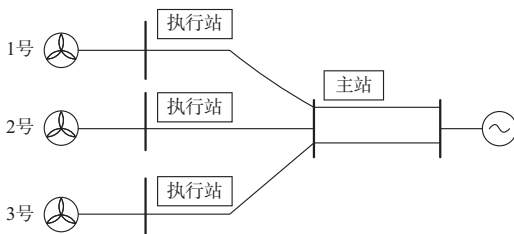


图1 典型风电外送主接线图
Fig.1 Wiring diagram of a typical wind power transmission

1.2 LVRT 期间风电机组有功功率的变化

风电机组属于被动式发电,在故障过程中,其输出功率与机端电压、转子过流能力以及控制方式相关。即使风电机组具备 LVRT 能力,大量的研究与现场数据显示,在故障隔离后,大致需要 2~10 s 的时间风电机组输出功率才能恢复到故障前水平;而对于不具备故障穿越能力的风电机组,很多具备自动复位并网功能,在检测到并网电压恢复可以并网时,大致经过 2~10 min,这些故障过程中脱网的风电机组又开始并网发电。这 2 种情况下风电场的有功输出功率如图 2 所示。图中: t_0 为故障发生的初始时刻; P 为风电机组输出功率。

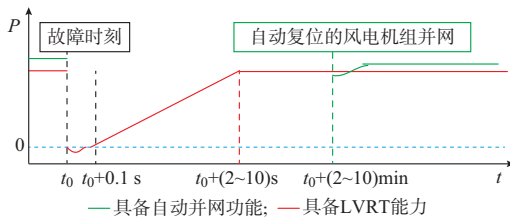


图2 风电机组在故障穿越时输出功率曲线
Fig.2 Output power curve of wind turbine during fault traversal

1.3 风电机组 LVRT 能力对过载控制的影响分析

实际工程中对于过载控制主要有 3 种方式。

1) 事件驱动方式:根据事故前方式和故障进行控制,这种控制方式主要解决因某一确定故障引起

的过载问题,过载设备可能是多个。

2) 响应驱动方式:检测设备的电流或功率超过限值,并在一定延时后执行控制。这种控制方式主要解决多个故障或复杂工况引起的过载问题,过载设备是确定的,但引起过载问题的因素复杂,很难判断。

3) 事件+响应驱动方式:检测到故障,并且检测到设备有过载问题后执行控制,这种控制主要解决确定故障引起的确定性过载问题。

在事件驱动方式下,安控装置采用事故前 0.2 s 的断面信息进行过载控制,如果风电机组全部具有 LVRT 能力,主站能够准确给出过载量;反之,如果部分风电机组不具备 LVRT 能力,在暂态过程中脱网,由于脱网的信息并不能反映到策略中,此时主站给出的过载量存在过切风险。

在响应驱动方式和事件+响应驱动方式下,安控装置根据实时采集信息进行判断和控制。如果风电机组在暂态过程中出现脱网,而风电机组自动并网时间较长,过载动作延时难以躲过风电机组自动并网时间,过载首轮存在欠切风险,可能在风电机组自动并网后再次出现过载;即使风电机组具备 LVRT 能力,在 LVRT 后有功率恢复过程中过载首轮动作,即过载动作延时短于风电机组有功功率恢复时间,也存在欠切风险。3 种过载控制方式下,是否具备 LVRT 能力对过载首轮动作效果影响的总结如表 1 所示。

表 1 风电机组 LVRT 能力对不同过载控制方式的影响
Table 1 Effects of LVRT ability of wind turbine on overload control modes

过载控制方式	是否具有故障穿越能力	过载断面信息采集时刻	首轮切机效果
事件驱动方式	是	故障前 0.2 s	正确
	否	故障前 0.2 s	存在过切风险
响应驱动方式	是	实时检测	存在欠切风险
	否	实时检测	存在欠切风险
事件驱动+响应方式	是	实时检测	存在欠切风险
	否	实时检测	存在欠切风险

1.4 对过载控制方案的建议

由表 1 可见,无论采用哪种过载控制方式,在考虑风电机组 LVRT 能力后,由于故障后检测信息不足导致过载控制量和可控对象无法准确获取,一轮动作方案很难精确消除过载,因此,本文建议过载采用多轮次切机方案。根据实际工程情况,如果需要解决的过载问题是由确定性故障引起,则采取事件驱动+响应方式多轮次切机方案;如果需要解决的过载问题是由复杂原因引起,则采取响应驱动方式

多轮次切机方案。同时建议过载第一轮动作延时大于未脱网风电机组 LVRT 后功率恢复时间,安控装置根据实时过载量切除一部分风电机组;过载第二轮动作延时应大于脱网机组自动并网时间,待风电机组一系列动态过程完成之后,再根据实时过载量,执行第二轮切机动作。过载控制时序与风电机组故障后功率恢复时序如图 3 所示。

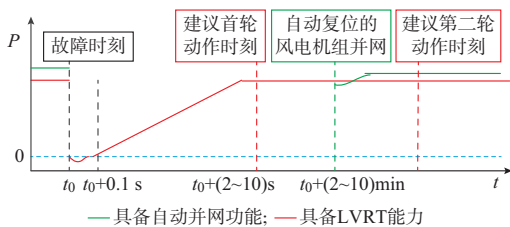


图3 风电机组有功恢复时序与过载控制时序对照
Fig.3 Sequence comparison of wind turbine's power recovery and overload control

2 风电短时出力波动对过载控制影响及对策

风电短时出力波动对过载控制的影响亦可从过载判断和切机执行效果两个方面分析。在过载判断方面,风电出力波动会引起短时潮流增大或降低,事件驱动方式下需要元件跳闸事件来启动过载逻辑,因此风电的短时波动不会导致误动或拒动。对于响应驱动方式,当输出风电功率在过载边界的时候,风电短时出力波动更可能引起误判,需要在设备短时过载能力允许的情况下尽量增加延时,减少误判的可能性。

在切机执行效果方面,传统的控制策略是根据过载量,按照既定的优先级顺序选择切除风电,直至所切风电的当前出力不小于过载量,一般不考虑各风电场出力的变化趋势。然而,由于风电场的出力具有波动性,当风电送出线路过载时,有的风电场出力正处于上升阶段,有的风电场出力处于下降阶段,还有的风电场出力相对平稳。如果不考虑各风电场的出力变化趋势,只是按照传统策略完成切机措施,那么有可能造成剩下的风电场出力正处于上升阶段,有可能使风电送出线路再次发生过载。若这些风电场出力上升较快,还可能导致过流保护动作,切除送出线路,从而失去风电外送通道。

以图 1 所示的典型案例为例。假设 1,2,3 号风电场初始出力为 80,60,30 MW。假设送出断面的出力限制为 190 MW,过载动作延时时间为 1 min。0 s 时刻开始,1 号风电场出力开始增加,2 号风电场出力减少,3 号风电场出力平稳,如图 4 所示。经过 6 min 后,送出联络线 L_1 和 L_2 功率超过 190 MW

出力限制,装置判过载;经过 1 min 延时,发出过载切机指令,根据最小过切原则切除 2 号风电场,过载消失;但由于 1 号风电场仍然处于出力上升阶段,当出力继续增大,在 12~13 min 左右,送出联络线 L_1 和 L_2 再次超过 190 MW 功率极限,再次过载。

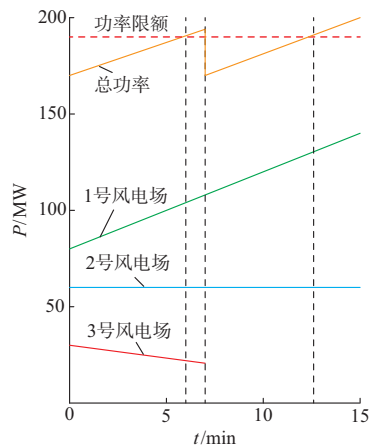


图4 风电场出力曲线
Fig.4 Curvs of wind farm output

3 考虑风电出力变化趋势的过载切机方法

当风电送出线路发生过载时,控制主站装置根据当前电网运行方式和送电断面潮流情况,按照策略计算每轮动作的过载量,确定和过载线路相关的风电场,再根据各相关风电场的出力变化趋势,优先切除当前出力处于上升阶段风电场,若不够切,再将剩余需切量分配给其他和过载相关的风电场。

确定风电场的出力变化趋势是本方法的重点。安控系统相对独立,若与风功率预测系统互联获取数据存在运行管理、系统联调等多方面问题。因此,本文提出由安控装置通过实时分析自身采样数据来确定各风电场的出力变化趋势。由于实时采样数据一直在允许误差范围内波动,不能直接利用该数据来判断当前风电场的出力变化趋势。因此,首先将稳控装置实时采集的风电场并网功率数据按如下公式进行处理。

$$P_{ave}(t) = \frac{\int_{t-\Delta T}^t p(t) dt}{\Delta T} \quad (1)$$

式中: $P_{ave}(t)$ 为时刻 t 之前某风电场 ΔT 时段内的功率均值; $p(t)$ 为 ΔT 时段内实时采样数据;时间常数 ΔT 为计算时刻 t 风电场并网功率均值所参考的数据时段。

时段 T 内的风电场出力曲线可以用 m 次多项式曲线拟合,时段 T 内某风电场出力曲线函数 $P(t)$ 为:

$$P(t) = \alpha_0 t^m + \alpha_1 t^{m-1} + \alpha_2 t^{m-2} + \dots + \alpha_m \quad (2)$$

式中: $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ 为系数。

将时段 T 平均分为 m 个时段, 由式(1)计算时段 T 内 t_0, t_1, \dots, t_m 时刻风电场功率值 $P_{ave}(t_0), P_{ave}(t_1), \dots, P_{ave}(t_m)$, 将所得结果代入式(2)中, 即可确定该时段 T 内风电场出力曲线函数 $P(t)$ 的各个系数。在实际工程中, 拟合曲线时段 T 的选取应该根据各风电场的实际出力曲线特点来确定; 对于 m 值选取, m 值越大, 函数系数计算所需时间越长, 曲线拟合效果越好, 通常只要不影响风电出力变化趋势的判断, m 值的选取应该尽可能小。待 $P(t)$ 函数系数确定, 装置即可求取当前时刻各风电场的出力曲线斜率 K_i , 即

$$K_i = P'(t) |_{t=T} \quad (3)$$

斜率变化率 S_i 为:

$$S_i = P''(t) |_{t=T} \quad (4)$$

通过计算各风电场的出力曲线斜率 K_i 和斜率变化率 S_i , 可以准确判断当前各风电场的出力变化趋势。当某风电场的 $K_i > 0$, 说明该风电场的出力处于上升阶段; 当某风电场的 $K_i < 0$, 说明该风电场的出力处于下降阶段; 当某风电场的 $K_i = 0$, 说明该风电场出力处于平稳阶段或者其未来变化趋势无法判定。各个阶段风电场切机排序优先级如表 2 所示, K_d 为预先设定的斜率阈值。

表 2 切机优先级排序表
Table 2 Cutting machine priority table

阶段名称	优先级别	数学描述	同级别内排序方法
快速上升	最高	$K_i \geq K_d$	按斜率 K_i 大小排序
启动上升	高	$0 < K_i < K_d$ 且 $S_i > 0$	按斜率变化率 S_i 大小排序
缓慢上升	较高	$0 < K_i < K_d$ 且 $S_i \leq 0$	按斜率 K_i 从大到小排序
其他	低	$K_i \leq 0$	按出力比例分配过载需切量

当风电送出线路发生过载时, 控制主站装置根据风电场出力变化趋势, 动态选择切机对象, 具体可分为以下两种情况。

设当前风电需切总量为 P_{cutsum} , 与过载线路相关的出力处于上升阶段的风电场并网总功率为 $\sum P_{up}$, 剩余的相关风电场并网总功率为 $\sum P_{other}$ 。

当 $\sum P_{up} \geq P_{cutsum}$ 时, 控制主站装置对出力处于上升阶段的相关风电场进行动态的分级排序, 并按最小过切原则顺序切除各相关风电场的出力馈线, 直至被切除风电累加量不小于 P_{cutsum} , 则切机任务完成。

当 $\sum P_{up} < P_{cutsum}$ 时, 控制主站装置直接将出力处于上升阶段的相关风电场全部切除, 剩余的风电需切量再按比例分配给其他的相关风电场, 其他相关各风电场的切机量按如下公式计算:

$$P_{kcut} = \frac{P_k(t)}{\sum P_{other}} (P_{cutsum} - \sum P_{up}) \quad (5)$$

式中: P_{kcut} 为按风电出力比例分配给第 k 个风电场的需切量; $P_k(t)$ 为第 k 个风电场的当前出力。

通过分析以上两种可能出现的情况, 采用该方案的过载控制装置既能够完成风电送出线路过载切机任务, 又能够动态优化地选择切机对象, 并有效地降低风电送出线路再次发生过载的概率。

4 算例分析

以西北某地区风电外送为例, 该地区主要的大型风电场 2 h 内出力变化如图 5 所示。风电出力比例占 40% 左右, 以 330 kV 双回线外送。330 kV 线路过载动作门槛设定为 1 200 A (约 685 MW), 在第 73 min 发生 N-1 故障, 一回线路断开, 另一回路电流上升电流为 1 259 A (约 720 MW)。过载动作时各个风电场的出力见表 3。

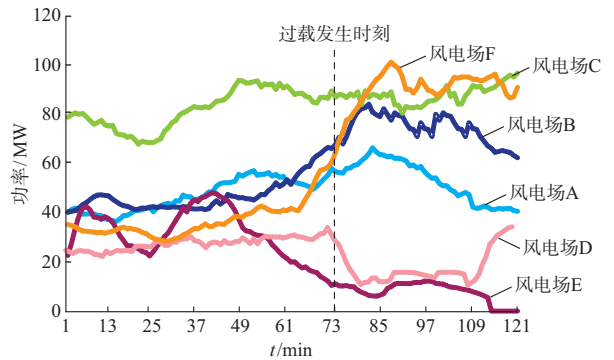


图 5 某地区风电场 2 h 典型出力
Fig.5 Typical wind farm output in 2 h

表 3 风电场切机排序
Table 3 Cutting machine scheduling

风电场	功率/MW	本文排序优先级
A	53.3	较高
B	64.4	高
C	81.5	较高
D	28.5	低
E	10.5	低
F	55.2	最高

按照原策略, 需切除风电场 D 和 E 共计 35 MW 风电机组, 实际切除 37.5 MW。切除风电场 D 和 E 后, 由于风电场 B 与风电场 F 处于出力上升阶段, 线路潮流再次超过门槛值 685 MW, 发生二次过载,

如图 6 所示。

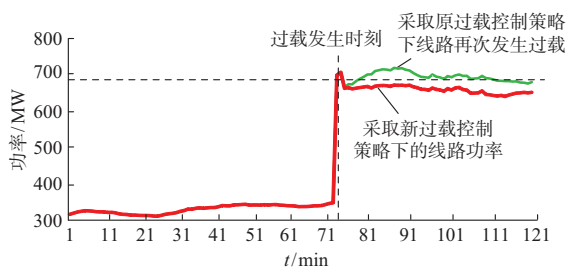


图 6 不同措施下过载控制效果

Fig.6 Effects under different overload control strategies

按照本文所提方法,切机排序如表 3 所示。此时风电场 F 优先级最高。风电场 F 接收切机 35 MW 指令后,实际切除 38.6 MW,线路不会发生二次过载。对比图 6 中的曲线可知,本文提出的控制方法能降低二次过载的概率。

5 结语

本文针对包含风电场群集中并网且不能满足 $N-1$ 安全稳定约束情况下的过载控制问题,分别分析了风电机组 LVRT 能力、自动并网恢复能力以及风电短时功率波动对于送出线路过载控制的影响,对传统过载控制方案提出针对性建议,并在此基础上进一步提出考虑风电出力变化趋势的过载切机方案。该方案根据各风电场出力变化趋势,动态优化选择切机对象,使得切机措施更加高效,减小风电送出线路再次发生过载的概率,从而保证风电外送通道的安全性。

参考文献

[1] 李俊峰,蔡丰波,乔黎明,等.2014 年中国风电发展报告[R].北京:中国循环经济协会可再生能源专业委员会,2014.

[2] 张梅,牛拴保,李庆,等.酒泉风电基地短路试验分析及仿真[J].电网技术,2014,38(7):903-909.
ZHANG Mei, NIU Shuanbao, LI Qing, et al. Analysis and simulation of the short-circuit test of Jiuyan wind power base [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 903-909.

[3] 毕天姝,刘素梅,薛安成,等.具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):26-31.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault analysis of doubly fed induction generator wind turbines with low-voltage ride-through capability [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.

[4] 欧阳金鑫,熊小伏,张涵轶.电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J].中国电机工程学报,2011,31(22):17-25.
OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.

[5] 张艳霞,童锐,赵杰,等.双馈风电机组暂态特性分析及低电压穿

越方案[J].电力系统自动化,2013,37(6):7-11.

ZHANG Yanxia, TONG Rui, ZHAO Jie, et al. Transient characteristics analysis and low voltage ride-through scheme of doubly-fed wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 7-11.

[6] 宋少群,付超,王毅,等.适合风电特性的联络线过载切机装置控制策略[J].电力系统及其自动化,2010,34(15):52-55.
SONG Shaoquan, FU Chao, WANG Yi, et al. Control strategy of tie-lines equipped with overload safety device adapted for wind power characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 52-55.

[7] 陈树勇,陈会元,唐晓骏,等.风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J].电网技术,2013,37(2):514-519.
CHEN Shuyong, CHEN Huiyuan, TANG Xiaojun, et al. Generator tripping control to uphold transient stability of power grid outwards transmitting thermal-generated power bundled with wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 514-519.

[8] 丁剑,邱跃丰,孙华东,等.大规模风电接入下风电机组切机措施研究[J].中国电机工程学报,2011,31(19):25-36.
DING Jian, QIU Yuefeng, SUN Huadong, et al. Consideration of wind generator tripping under large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 25-36.

[9] 汤奕.风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J].电力系统自动化,2013,37(20):34-40.
TANG Yi. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 34-40.

[10] 任建文,李莎,严敏敏,等.基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧急控制策略[J].电网技术,2013,37(2):392-397.
REN Jianwen, LI Sha, YANG Minmin, et al. Emergency control strategy for line overload based on power flow tracing algorithm [J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 392-397.

[11] 程临燕,郝治国,张保会,等.基于内点法消除输电断面过载的实时控制算法[J].电力系统自动化,2011,35(17):51-55.
CHENG Linyan, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Fast elimination of overload in transmission line section based on simplified primal-dual interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 51-55.

[12] 雷霆,胡晓飞,胡世骏,等.基于稳态数据的调度主站热稳定控制技术[J].电力系统自动化,2013,37(11):103-106.
LEI Ting, HU Xiaofei, HU Shijun, et al. Thermal stability control technology in dispatching center based on grid steady-state data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 103-106.

[13] 牛建伟,李正,马强,等.张家口风电外送稳定控制系统应用与实施[J].华北电力技术,2011(7):14-19.
NIU Jianwei, LI Zheng, MA Qiang, et al. Application of the power transmission stabilization control system for wind power generation at city Zhangjiakou [J]. North China Electric Power, 2011(7): 14-19.

[14] 刘臣宾,夏彦辉,常东旭,等.基于 GPRS 的风电并网稳定控制系统[J].电力自动化设备,2010,30(7):104-108.
LIU Chenbin, XIA Yanhui, CHANG Dongxu, et al. Wide-

area protection and control system based on GPRS for grid-connected wind farm [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2010, 30(7): 104-108.

陈永华(1979—),男,通信作者,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定控制。E-mail: chen Yonghua@

sgepri.sgcc.com.cn

唐冠军(1988—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。

宋晓芳(1980—),女,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 王梦岩 章黎)

Overload Control Method of Transmission Lines Considering Wind Power Characteristics

CHEN Yonghua^{1,2}, TANG Guanjun^{1,2}, SONG Xiaofang^{1,2}, LI Xueming^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Any line outage will lead to other lines overloading when the wind farm grid connection lines does not meet the $N-1$ security constraints. Considering cluster grid connected wind farms characteristics, this paper analyzes the impact of the wind farm's low voltage ride through (LVRT) capability and short-term fluctuations on the traditional overload control scheme first, and then proposes a new generator tripping scheme on overload considering the trend of wind farm output. The trend is analyzed by using numerical method, optimizing tripping machine object dynamically, making overload control more efficient and reducing the chance of wind farm grid connection lines overloading. The method will enhance the wind farms transmission corridor safety and reliability.

This work is supported by National Key Technologies R&D Program (No. 2012BAA15G00) and State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (No. SGCC-MPLG003-2012).

Key words: wind power generation; overload control; low voltage ride through; short-term fluctuations; generator tripping strategy