

DOI: 10.7667/PSPC160736

综合FACTS和HVDC协调优化的大规模风电脱网控制方法

常海军¹, 侯玉强¹, 柯贤波², 李威¹, 牛拴保², 吕亚洲¹, 魏平², 张慧玲³

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211102; 2. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048;
3. 国网宁夏电力公司, 宁夏回族自治区 银川 750001)

摘要: 随着交直流混联电力系统的快速发展, 目前灵活柔性交流输电系统(FACTS)和特高压直流输电系统在我国电力系统中已得到广泛应用, 为近年来我国风电大规模脱网问题提供了新的控制技术和有效手段。分析了系统交直流故障后的风电脱网场景, 表明抑制故障后系统电压大幅波动是减少风电大规模脱网的关键。在此基础上, 阐述了事故前 FACTS 优化配置和事故后采取 HVDC 紧急功率支援协调抑制风电大规模脱网的必要性。并基于对风电场汇集母线电压波动的改善灵敏度, 以保证系统安全性为前提, 通过协调优化事故前 FACTS 动态无功补偿设备布点、容量配置和事故后直流紧急功率支援, 提出一种风电脱网控制代价最小的 FACTS 和 HVDC 的协调优化方法, 实现风电脱网的抑制和电网的经济运行。最后, 以实际规划电网进行了仿真验证, 证明了该方法的有效性。

关键词: FACTS; HVDC; 风机脱网; 控制代价; 协调优化

A method of synthesizing coordinated optimization between FACTS and HVDC for curbing large-scale wind turbine tripping

CHANG Haijun¹, HOU Yuqiang¹, KE Xianbo², LI Wei¹, NIU Shuanbao², LÜ Yazhou¹, WEI Ping², ZHANG Huiling³

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211102, China;
2. Northwest Subsection of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;
3. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Along with the rapid development of AC-DC hybrid power system, flexible AC transmission system (FACTS) and HVDC transmission system has been widely used in electric power system, which provides a new control technology and effective means for curbing large-scale wind turbine tripping in china in recent years. The wind turbine tripping scene after the AC/DC faults is analyzed, which shows that suppressing large voltage fluctuation after fault is the key of reducing wind turbine tripping, and then the necessity of coordination between the optimal configuration of FACTS equipment before fault and HVDC emergency power support after fault for curbing wind turbine tripping is expounded. On the premise that power system is security and stability, it explores ways of solving the problem of large-scale wind turbine tripping through coordinated optimization between FACTS and HVDC with minimum cost control. Under the sensitivity index of improving the wind farm collection bus bar voltage fluctuation, it realizes curbing large-scale wind turbine tripping and economic operation of power grid through coordination optimization with pre-accident stationing and capacity configuration of FACTS equipment and post-accident HVDC emergency power support. At last, it is validated by a schedule power grid.

Key words: flexible AC transmission system (FACTS); high-voltage direct current (HVDC); wind turbine tripping; control costs; coordination optimization

0 引言

“十二五”期间, 我国在河北、蒙东、蒙西、

基金项目: 国家电网公司西北分部科技项目“多电源类型特高压送端电网源协调技术深化研究”; 国家电网公司科技项目“计及受端电网约束的特高压直流外送大规模新能源发电送端电网调度运行关键技术研究与应用”

吉林、甘肃、山东、江苏、新疆和黑龙江等地建设了多个千万千瓦级大型风电基地, 至 2015 年上述大型风电基地装机容量总计达到 7900 万 kW 以上, 风电占全国发电总量比例将达到 3%, 对于提高我国清洁能源利用率、促进低碳减排具有重要意义。

根据不同厂家生产工艺、技术水平, 接入电网的风机均制定了保护其设备安全运行的保护控制系统, 设定了相应参数。其中, 与电网侧相关的主要

有故障期间的低电压穿越能力、耐高压保护、高/低频保护等。为降低接入电网的风机发生大规模脱网对系统安全稳定运行产生的不利影响的风险, 国内外均对风机的涉网水平提出了相应的标准。

目前, 我国风电多以规模化集中接入电网方式为主, 大规模集群式接入对当地电网的影响越来越明显^[1]。伴随我国特高压交直流混联大电网深入发展, 采用“风火打捆”交直流外送是未来千万千瓦级风电能源基地电力外送的重要方式之一^[2], 网源、交直流间的交互影响将更加紧密。新能源发电占比的提高及近年来发生的多次大规模风机脱网事件^[3-11]使得我国大规模风机脱网的潜在风险仍不可忽视。一方面需提高风电设备涉网能力和对风电场地管理水平, 另一个方面也需积极提高对风电脱网事故风险的抑制能力, 优化风电场内动态无功补偿设备。随着我国智能电网的快速建设, 特高压直流输电系统和各种灵活交流输电(Flexible AC Transmission System, FACTS)设备已在我国实际电网中得到广泛使用, 使得电网的运行控制更加灵活和经济, 也为近年来我国风电大规模脱网问题提供了新的控制技术。

文献[12]提出一种综合风电机组撬棒保护、直流系统功率调制和交流系统紧急电压控制来抑制风电机组相继脱网的方法, 降低风电机组在故障期间的低压脱网代价, 通过风电场近区大容量直流的功率快速调制并协同交流侧紧急电压调控手段, 改善风电送出通道的潮流分布, 以提高故障后电网暂态电压稳定性。文献[13]分析了特高压直流闭锁故障后不同稳控方案对于高密度风电、交直流送端电网运行电压的影响, 研究的稳控方案对提高 ± 800 kV特高压直流送端系统的稳定运行水平与高密度风电地区的电压稳定性具有重要的参考价值。文献[14]提出了一种基于直流功率调制的电压控制方法, 以直流功率调整量最少为目标计算优化控制策略。文献[15]针对风电场的无功功率平衡和电压稳定问题, 提出了一种综合运用SVC及双馈机组的无功调节能力达到风电场与电网交换无功功率值目标的控制策略。文献[16]分析了装设可控高抗对系统过电压、潜供电流和恢复电压等的影响。文献[17]总结分析了近年来国内外关于多种FACTS协调控制方法, 并评述了其优点和不足, 指出FACTS协调控制中需进一步关注与风电、光伏发电等新能源的协调。文献[18]从原理上阐明目前动态无功补偿装置所广泛采用的感性支路恒无功控制方式将导致大规模风电汇集地区电网无功—电压灵敏度增大, 是导致“5.14”风电大规模脱网的主要原因之一。

本文基于风机脱网典型故障场景, 分析总结了导致风电脱网的关键影响因素。在此基础上, 讨论了FACTS与HVDC协调优化的必要性, 提出了以风电脱网控制代价最小为目标的FACTS和HVDC的协调优化模型, 通过协调优化事故前FACTS动态无功补偿设备布点、容量配置和事故后直流紧急功率支援, 实现风电脱网的抑制和电网的经济运行。

1 风机脱网场景分析

交流电网的强弱程度、系统及风电场动态无功补偿装置配置是否充足及其响应速度是否及时、风机的故障穿越能力是否适应、故障扰动强度等多方面的因素决定系统发生大规模风电脱网的风险程度。根据仿真分析及近年来发生的多次风机大规模脱网事件现场调查^[19], 表明风电场近区交流系统短路冲击、大功率直流闭锁、大功率直流换相失败、再启动过程均可能导致风电大规模脱网, 并可能诱发系统发生连锁故障, 从而使电网面临不可控和崩溃的风险。

1.1 交流短路冲击导致的风机脱网场景

交流短路冲击导致风机脱网的场景可分为两种: 一种是风电场附近为纯交流系统; 另一种是风电场附近含大功率外送直流的交直流混联系统。本文分别就以上两种场景进行了仿真分析。

针对前者, 考虑我国《风电场接入电力系统技术规定》^[20], 以下简称《规定》, 基于华北电网某典型方式, 仿真模拟220 kV张北—万全双回线N-1三永故障, 结果表明短路故障期间风机机端电压将大幅下降, 甚至超过《规定》中风机最低跌落电压0.2 p.u.的要求, 造成约425 MW风机脱网, 如图1所示为故障后风机机端电压响应曲线。

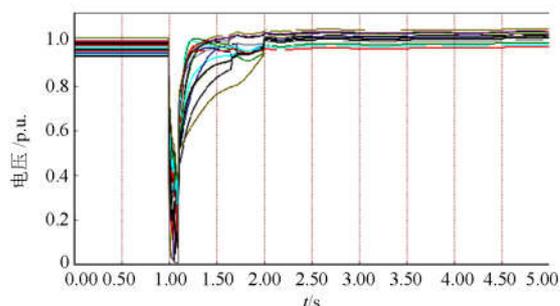


图1 220 kV 张北—万全双回线 N-1 三永故障后风机机端电压响应曲线

Fig. 1 Dynamic response curve of fan terminal voltage after 220 kV Zhangbei-Wanquan lines “N-1” three-phase permanent fault

针对后者，基于宁夏电网某典型方式，仿真模拟了灵绍特高压直流(输送功率8000 MW)和宁东超高压直流(输送功率4000 MW)送端银川东与灵州双回750 kV交流联络线N-1三永故障，结果表明短路故障期间风机电压大幅跌落，灵绍和宁东直流功率大幅下降，造成近区无功大量盈余，短路故障消除后将导致近区风电电压大幅升高。如图2所示为故障后风机机端电压及灵绍、宁东直流有功功率曲线，风电机端电压大于1.1 p.u.而脱网。

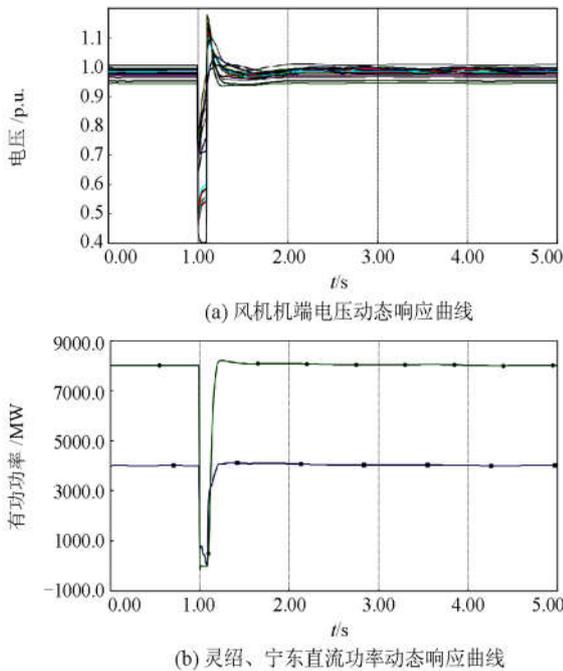


图2 750 kV银川—灵州双回线N-1三永故障后风电机端电压及直流功率动态响应曲线

Fig. 2 Dynamic response curve of fan terminal voltage and active power of Lingshao and Ningdong HVDC after 750 kV Yinchuan-Lingzhou lines “N-1” three-phase permanent fault

1.2 直流故障冲击导致的风机脱网场景

直流具有多种故障扰动形式，如直流闭锁、换相失败、再启动等。由于直流换流站大量滤波器的存在，在发生上述故障扰动后，直流功率在暂态过程中将发生大的改变，从而引起近区无功大量过剩，以致系统暂态电压大幅升高，在弱交流系统中均可能导致近区风电发生脱网。图3为宁夏电网某典型方式下灵绍直流(输送功率8000 MW)分别发生双极闭锁、换相失败、再启动过程中近区风机电压动态响应曲线，可以看出故障后动态过程中风机电压均有大幅升高。

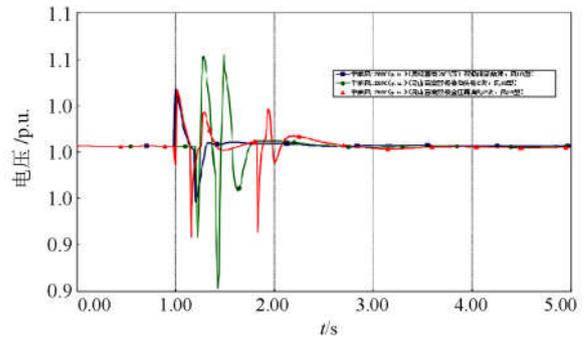


图3 灵绍直流不同故障扰动形式下近区风机电压动态响应曲线

Fig. 3 Dynamic response curve of fan terminal voltage after Lingshao HVDC with different faults

1.3 风机脱网的关键影响因素

从以上可以看出，故障扰动前后引起的系统电压大幅波动超过风电机组耐压能力是导致风机大规模脱网的关键因素，因此抑制风机机端电压波动峰值在机组的耐压范围内是抑制和减少风机大规模脱网的关键。

2 FACTS 与 HVDC 协调优化的必要性

根据《规定》要求，风电场要充分利用风电机组的无功容量及其调节能力；当风电机组的无功容量不能满足系统电压调节需要时，应在风电场集中加装适当容量的无功补偿装置，必要时加装动态无功补偿装置。

目前，对于大型风电场群大都配置有SVC、SVG等动态无功补偿装置用以控制并网点的电压水平，改善电网暂态电压稳定性。但由于各风电场在配置时仅考虑了本身的需求，没有从电网和整个风电场群出发，经济性和电网发生故障后的补偿动作的协调性不足。此外，由于电网交直流故障后的系统暂态电压变化较快，如果动态无功补偿装置的响应速度无法及时进行调整，就可能起到相反的效果，如大功率直流近区交流短路冲击，在短路期间，系统电压大幅下降，此时需动态无功补偿装置向系统注入容性无功，而当短路故障消除后系统电压由于短路期间直流功率大幅下降带来的滤波器无功大量过剩叠加动态无功补偿装置发出的无功将使系统电压大幅升高，这时，就需要动态无功补偿装置及时改变响应策略，否则，会带来不利的效果，如图4为宁夏电网某典型方式下考虑SVC前后灵川双回N-1三永故障后风机机端电压比较，可以看出加装了SVC后风机电压幅值更高。

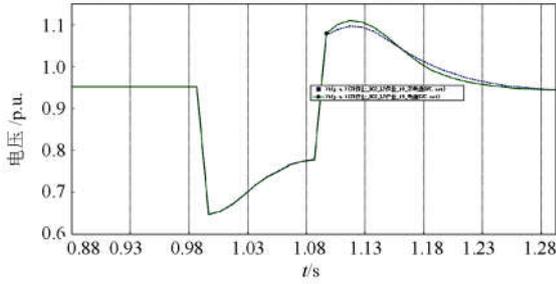


图4 考虑 SVC 前后 750 kV 银川-灵州双回线 N-1 三永故障后风机机端电压动态响应曲线

Fig. 4 Dynamic response curve of fan terminal voltage after 750 kV Yinchuan-Lingzhou lines "N-1" three-phase permanent fault considering of SVC

因此, 对于大型风电场群来讲, 仅靠配置动态无功补偿设备来抑制电网故障后风机电压波动的方法在经济性、协调性和适应性方面存在优化和不足, 从电网控制的层面讲, 其属于预防控制的范畴, 还需与具体故障结合, 引入紧急控制措施和策略。本文基于目前交直流混联电网发展趋势和 FACTS 在电网中的广泛应用, 从经济性和适用性两方面综合利用 FACTS 与 HVDC 协调优化的大规模风电脱网控制方法。

3 综合 FACTS 与 HVDC 协调优化的风电脱网控制方法

3.1 数学模型

本节探讨制定了以风机脱网控制代价最小为优化目标的 FACTS 和 HVDC 的协调优化数学模型。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min C = \sum_{j=0}^N Q_j^{\text{SVC}} \times \alpha + \sum_{k=0}^L Q_k^{\text{MCSQ}} \times \beta + \\ \quad \sum_{l=0}^O P_l^{\text{DC}} \times \gamma + P_{\text{LWG}} \times \sigma \\ \text{s.t.} \quad \begin{array}{l} g(x) = 0 \\ h(x) \leq \varepsilon \end{array} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: C 代表预想故障下风机脱网抑制控制代价; Q_j^{SVC} 代表 j 个风机并网点加装的 SVC 容量; α 代表 SVC 以容量为单位的的价格; Q_k^{MCSQ} 代表 k 个加装的可控并联电抗器容量; β 代表以容量为单位的可控并联电抗器价格; P_l^{DC} 代表 l 个直流紧急功率支援功率量; γ 代表直流紧急功率支援代价; P_{LWG} 代表保证系统安全稳定前提下的风机脱网量; σ 代表单位脱网量产生的代价; $g(x) = 0$ 为系统等式约束, 如潮流方程等; $h(x) \leq \varepsilon$ 为系统不等式约束, 包含

控制量的容量限制和系统稳定要求, 且后者必须通过系统稳定分析来判断。

3.2 协调优化步骤

由于引起风机脱网的关键因素为电压, 因此控制风机并网点电压波动是抑制风机大规模脱网的关键。下面结合这个特性研究了综合 FACTS 设备配置与 HVDC 协调优化的风机大规模脱网抑制方法。

第一步, FACTS 设备及其配置地点的选取。

根据具体电网网架和特性, 选取风电场汇集站母线 i 作为电压裕度变化监视的参考点, 并在其近区选取 n 个厂站母线作为 FACTS 设备候选配置地点, 基于 EEAC 量化分析软件, 仿真预想故障下风电场电压监视参考点 i 的初始电压裕度 η , 摄动求取候选配置地点加装 FACTS 设备后电压监视点 i 的电压裕度 η' , 求取电压裕度改善值 $\Delta\eta$, 考虑 FACTS 的配置代价 C , 计算其电压控制性价比 $\Delta\eta/C$, 并依次排序, 选取性价比高的 FACTS 设备及其配置地点。

第二步, 参与紧急功率支援的直流设备的选取。

由于不同直流系统对风电场汇集母线电压变化调节灵敏度可能存在较大差异, 因此, 可通过离线摄动或在线分析计算方式确定直流功率支援对风电汇集母线 i 的电压影响的灵敏度, 考虑选取灵敏度较大的直流 LD_i 参与功率调制, 直流功率调制量受送受端系统安全稳定约束和本身直流最大负荷约束。

第三步, 综合 FACTS 和 HVDC 的协调优化。

在以上基础上, 以式(1)为优化模型, 对 FACTS 的配置和 HVDC 的控制策略进行协调优化, 考虑安全稳定运行约束情况下系统可承受一定风机脱网, 因此, 本文通过以风机脱网代价形式计入总控制代价。最终, 通过优化模型选取控制代价最小的策略执行。

4 算例验证

以图 5 所示某规划电网为例, D、J 站下均有大规模风电接入, HVDC 直流 TZ 外送为 800 万 kW, HVDC 直流 ZD 外送 800 万 kW。TZ 直流双极闭锁后, 安控切机 600 万 kW, 系统暂态稳定, 盈余功率向 XB 电网区域转移, 电压大幅波动, 暂态过程中 D 和 J 地区风机脱网共 425 万 kW。

为减少风机脱网, 考虑的控制措施包括如下几方面。

n1, 加装可控高抗。候选地点: D 风场近区 A 站、D 站、E 站; J 风场近区 F 站、G 站、J 站。

n2, 加装 SVC。候选地点: D 风场近区 A 站、D 站、E 站; J 风场近区 F 站、G 站、J 站。

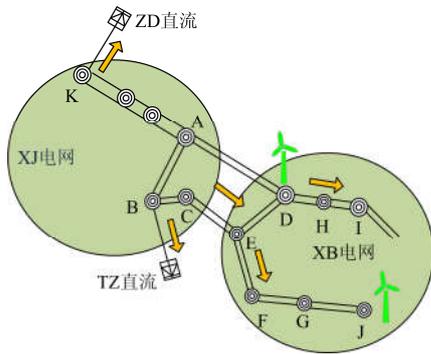


图 5 某电网风电接入示意图

Fig. 5 A diagram of a power grid with large-scale wind power integration

n3, 紧急提升 ZD 直流功率。

考虑直流紧急功率支援代价为 1 万元/MW, ZD 直流最大可提升量为 300 万 kW, 可控高抗和 SVC 的投资单价分别为 15 万元/Mvar 和 10 万元/Mvar, 风机脱网的单位代价为 0.5 万元/MW, 系统可承受风机脱网量为 50 万 kW, 分别对各候选地点加装 FACTS 设备进行摄动, 计算其电压安全裕度的变化量和与投资代价间的性价比, 性价比越高, 该地点加装 FACTS 设备的单位代价下电压稳定控制效果越好, 如表 1 和表 2 所示, 分别为 D 和 J 风电场近区 FACTS 设备不同安装地点下的电压控制性价比效果对比。

表 1 D 风电场近区 FACTS 设备不同安装地点电压控制性价比

Table 1 Voltage control characteristic with FACTS for different locations near the D wind farm

配置站	A 站		D 站		E 站	
	可控高抗	SVC	可控高抗	SVC	可控高抗	SVC
η	50.98					
摄动容量/Mvar	-50	50	-50	50	-50	50
η'	51.65	48.81	51.05	50.87	50.80	50.76
$\Delta\eta$	0.67	-2.17	0.07	-0.11	-0.18	-0.22
C	750	500	750	500	750	500
$\Delta\eta/C$	$8.9e^{-4}$	$-4.3e^{-3}$	$1e^{-6}$	$-2e^{-4}$	$-2e^{-4}$	$-4e^{-4}$

表 2 J 风电场近区 FACTS 设备不同安装地点下的电压控制性价比

Table 2 Voltage control performance ratio with FACTS for different locations near the J wind farm

配置站	F 站		G 站		J 站	
	可控高抗	SVC	可控高抗	SVC	可控高抗	SVC
η	22.53					
摄动容量/Mvar	-50	50	-50	50	-50	50
η'	25.72	20.58	25.54	25.25	24.72	26.64
$\Delta\eta$	3.19	-1.95	3.01	2.72	2.19	4.11
C	750	500	750	500	750	500
$\Delta\eta/C$	$4.2e^{-3}$	$-3.9e^{-3}$	$4e^{-3}$	$5.4e^{-3}$	$2.9e^{-3}$	$8.2e^{-3}$

由上述结果可知, 在不同的 FACTS 候选安装地点中, D 风场近区 A 站加装可控高抗及在 J 风场近区 J 站加装 SVC 的性价比最高。以此为基础, 考虑不同容量组合下的工作场景及直流紧急功率支援对近区电压的调节作用, 求取故障后抑制大规模风机脱网控制代价最少的方案。

可见, 在考虑可控高抗、SVC 投资代价, 直流紧急功率调制代价和不可控风机脱网代价时, 为使 TZ 直流双极闭锁故障后抑制风机脱网控制总代价最小, 应采用表 3 综合 FACTS 和 HVDC 的协调优

化方案中方案 1, 即 A 站加装 -50 Mvar 的可控高抗, 在 J 站加装 50 Mvar 的 SVC, 同时事故后紧急提升 ZD 直流功率 800 MW。

5 展望

大规模风电集中并网对电网的安全稳定运行及控制带来挑战。一方面亟需提高风电涉网性能和管理水平, 另一方面也须加强柔性交直流系统间的协调优化, 在保证系统安全稳定和风机尽量少脱网的前提下提高系统运行的经济性。

表 3 综合 FACTS 和 HVDC 的协调优化方案
Table 3 FACTS and HVDC coordinated control scheme

方案	A 站可控高抗/Mvar	J 站 SVC/Mvar	直流 ZD 紧急功率提升量/MW	考虑措施后风机脱网量/MW	总代价/万元
1	-50	50	800	445	2272.5
2	-50	50	1500	275	2887.5
3	-100	50	800	355	2977.5
4	-100	50	1500	176	3588
5	-50	100	800	260	2680
6	-50	100	1500	40	3270
7	-100	100	800	145	3372.5
8	-100	100	1500	0	4000

参考文献

- [1] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.
QI Shangmin, LI Fengting, HE Shien, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [2] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [3] 孙华东, 张振宇, 林伟芳, 等. 2011 年西北电网风机脱网事故分析及启示[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 76-80.
SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis on serious wind turbine generators tripping accident in northwest china power grid in 2011 and its lessons[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80.
- [4] 国家电力调度通信中心. 关于近期风电大规模脱网情况的通报[R]. 2011.
Electric Power Dispatching & Communication Center of State Grid Corporation of China. Report about the recent accidents of large-scale cascading trip-off of wind turbine generators[R]. 2011.
- [5] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137.
HE Shien, DONG Xinzhou. Cause analysis on large-scale wind turbine tripping and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 131-137.
- [6] 汪宁渤, 马彦宏, 丁坤, 等. 酒泉风电基地脱网事故频发的原因分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 42-46.
WANG Ningbo, MA Yanhong, DING Kun, et al. Analysis on root reasons of WTGS nuisance tripping in Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 42-46.
- [7] 张鹏, 赵喜, 尹柏清, 等. 大规模运行风机脱网事故调查分析[J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(2): 1-4.
ZHANG Peng, ZHAO Xi, YIN Boqing, et al. Investigation analysis to grid dropout accident of large scale operating wind power units[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2010, 28(2): 1-4.
- [8] 聂暘, 谷昱君, 孟庆功, 等. 提高双馈感应发电机无功支撑能力的低电压穿越控制策略研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(2): 53-57.
NIE Yang, GU Yujun, MENG Qinggong, et al. Research on LVRT control strategy for improving reactive power of DFIG[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(2): 53-57.
- [9] 陈鉴庆, 邹旭东, 梁宗泽, 等. 基于反向电流跟踪的双馈风机低电压穿越控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 221-229.
CHEN Jianqing, ZOU Xudong, LIANG Zonghe, et al. An improved control strategy of doubly-fed wind turbine under voltage dips based on reverse current tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 221-229.
- [10] 张阳, 黄科元, 黄守道. 一种双馈风力发电系统低电压穿越控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 153-158.
ZHANG Yang, HUANG Keyuan, HUANG Shoudao. Low voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 153-158.

[11] 刘金虹, 张辉, 李洁, 等. SMES 用于双馈发电机故障穿越的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(32): 199-205.
LIU Jinhong, ZHANG Hui, LI Jie, et al. Application of SMES to improve fault voltage ride through capability of doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(32): 199-205.

[12] 侯玉强, 刘福锁, 徐海波, 等. 撬棒保护与电网交直流控制协调的风电机组脱网抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 15-19.
HOU Yuqiang, LIU Fusuo, XU Haiibo, et al. A method for suppressing wind turbine cascading trip-off with crowbar protection and AC/DC coordinated control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 15-19.

[13] 钟显, 樊艳芳, 王一波, 等. 含高密度风电、交直流送端电网直流闭锁故障稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 130-138.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Research of stability control strategies for high density wind power, AC-DC sending grid bipole trip[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 130-138.

[14] 方勇杰, 刘福锁, 李威, 等. 一种基于直流功率调制的电压控制方法: 中国, 201110368218.9[P]. 2012-07-11.
FANG Yongjie, LIU Fusuo, LI Wei, et al. A method for voltage control using HVDC modulations: China, 201110368218.9[P]. 2012-07-11.

[15] 赵利刚, 房大中, 孔详玉, 等. 综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 45-50.
ZHAO Ligang, FAN Dazhong, KONG Xiangyu, et al. A strategy of reactive power control for wind farm operation using SVC and DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 45-50.

[16] 郑彬, 班连庚, 宋瑞华, 等. 750 kV 可控高抗应用中需注意的问题及对策[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 88-92.
ZHENG Bin, BAN Liangeng, SONG Ruihua, et al. Notable issues in application of 750 kV controllable shunt reactors and countermeasures[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 88-92.

[17] 黄柳强, 郭剑波, 卜广全, 等. FACTS 协调控制研究进展及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 138-146.
HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, BU Guangquan, et al. Research progress and prospect of FACTS coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 138-146.

[18] 谢欢, 吴涛, 赵亚清, 等. 计及动态无功控制影响的风电汇集地区高压脱网原因分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 19-24.
XIE Huan, WU Tao, ZHAO Yaqing, et al. Analysis on high-voltage trip-off causation of dense wind power areas considering impact of dynamic reactive power control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 19-24.

[19] 李丹, 贾琳, 许晓菲, 等. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 41-44.
LI Dan, JIA Lin, XU Xiaofei, et al. Cause and countermeasure analysis on wind turbines' trip-off from grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 41-44.

[20] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963-2011[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2011.
Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963-2011[S]. Beijing: China National Standardization Management Committee, 2011.

收稿日期: 2016-05-20; 修回日期: 2016-06-25

作者简介:

常海军(1981—), 男, 工程师, 研究方向为大电网安全稳定分析与控制; E-mail: changhaijun@sgepri.sgcc.com.cn

侯玉强(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为大电网安全稳定分析与控制;

柯贤波(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网安全稳定运行与控制。

(编辑 魏小丽)