

提高大规模风电接纳及送出的系统保护研究

廖志刚¹, 何世恩², 董新洲³, 王宾³, 曹润彬³, 施慎行³, 李津², 郑伟¹

(1. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省电力公司
风电技术中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 清华大学, 北京 100086)

摘要: 为了提高酒泉风电的接纳和送出, 从系统视角提出一种大规模风电接入电网线路的继电保护与控制一体化新方法。利用基于统计分析的潮流波动判据和基于本地信息量的潮流转移识别, 从风电潮流波动中甄别出某重负荷线路发生了故障、判别出该线路因故障被继电保护动作切除、进而还识别出原先由故障线路承担的负荷潮流转移到了非故障线路上, 并导致非故障线路过负荷。结合自适应过负荷保护, 在线路安全的前提下尽可能挖掘其潜在载流能力。同时融合紧急控制功能, 按实际需要切除风电, 消除非故障线路的过负荷而不是切除该线路, 解决连锁解网问题。在理论和仿真研究的基础上, 研制并现场安装保护装置并检验所提系统保护方案的正确性。

关键词: 大规模风电基地; 风电弃风; 系统保护; 风电接纳

Research on the system protection for enhancing the accommodation and transmission of large scale wind power

LIAO Zhigang¹, HE Shien², DONG Xinzhou³, WANG Bin³, CAO Runbin³, SHI Shengxing³, LI Jin², ZHENG Wei¹

(1. Electric Power Research Institute, Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China; 2. Wind Power Technology Center, Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China; 3. Tsinghua University, Beijing 100086, China)

Abstract: A novel integrated protection and control method for power lines connecting with large scale wind power is presented to improve Jiuquan wind power accommodation and delivery from the system viewpoint. The criteria based on statistics analysis of power flow fluctuation and identification of power transfer using local information are proposed to identify a heavy loading power line with a fault under wind power flow fluctuation, determine that the fault line is tripped by protection operation, and the power flow is transferred from the fault line to sound lines, which will lead to over load in sound lines. The potential loading capability of lines will be exploited under safety prerequisite with adaptive over load protection. Emergency control is used together to curtail wind power according to field conditions, and eliminate over loading in sound lines in replacement of tripping these lines, which will prevent cascading failure of grid. Based on the theory and simulation studies, protection devices are implemented and commissioned in the field and the correctness of the proposed system protection scheme is verified.

Key words: large scale wind power base; wind power curtailment; system protection; wind power accommodation

中图分类号: TM619

文章编号: 1674-3415(2015)22-0041-06

0 引言

中国政府承诺到 2020 年, 非化石能源占一次能源消费比重达到 15%^[1], 未来我国风能、太阳能发电还将持续快速发展。作为最早发展大规模风电的典型之一, 甘肃酒泉基地一直是我国风电发展的风向标。2009 年 8 月 8 日, 酒泉千万千瓦级风电基地一期项目正式开工。截至 2014 年 12 月 31 日, 甘肃电网新能源装机容量达到 1 524.4 万 kW, 其中风电 1 007.6 万 kW, 光伏 516.8 万 kW, 分别占全省总装

机容量的 25.29%、12.97%, 跃居全国各省级电网首位。预计到 2015 年底, 甘肃风电装机容量将达到 1 700 万 kW, 光伏并网容量将达到 750 万 kW 以上, 风电光伏将超过三峡工程总装机容量, 成为名副其实的“陆上三峡”。风电快速发展的背后是严重的消纳问题, 国家能源局指出: 2014 年全国风电平均利用小时数同比下降约 180 h, 但弃风限电问题仍是影响我国风电健康发展的主要问题^[2]。酒泉基地大部分电力需要通过 750 kV 超高压交流(EHVAC)及特高电压直流(UHVDC)输电通道输送到更远的

负荷中心^[3]。风电接入电网及远距离超特高压输电工程是风电基地开发并送出的关键。因此，需要电力系统发输电各个环节共同努力来缓解并逐步解决弃风问题。电网侧不仅要加强电网结构，建设输电通道，扩大新能源平衡范围，而且要有针对性的挖掘潜力。包含大规模风电并网的交直流混合超特高压电网，蕴含着随机扰动，且发生故障伴随潮流转移导致连锁反应的几率高，亟待从系统视角开展提高风电接纳及送出的继电保护研究。

任何连锁事故的发生是一个过程，其起因是故障，发展动因是切除故障线路造成的负荷转移。其他正常线路由于负荷转移而出现超负荷，其保护动作切除该线路，从而进一步加剧了其他非故障线路的过负荷，导致这些线路的保护相继动作跳闸，对风电输电通道来说，造成输电能力大大下降甚至中断，加剧风电弃风问题，也可给受电地区带来大扰动甚至大停电。

从这类事故的发生发展过程可见：如果继电保护能够从风电潮流波动中识别出某重负荷线路发生了故障；也能识别出该线路因故障被继电保护动作切除；同时还能知道原先由故障线路承担的负荷潮流转移到了非故障线路上，并导致非故障线路过负荷。那么不让非故障系统出现连锁跳闸的措施应该是：快速切除非故障线路所承担的送端部分或者全部出力、受端部分或者全部负荷而不是切除该线路，这可以从根本上消除非故障线路的过负荷^[4]。

为了防止类似事故包括大停电的发生，需要构建坚强的系统保护体系。为此，人们开展了广泛有效的研究工作，提出了许多新颖的技术方案和措施，比如广域保护(Wide Area Protection System, WAPS)、特殊保护系统(Special Protection System, SPS)等^[5]。但是由于广域测量系统对于通信通道的高度依赖，对于通信实时性的高要求，对于状态估计计算的快速性要求等，使得广域保护几乎无法实现。

为了从根本上防止类似事故的发生，最简单有效的措施就是：从具有快速动作性能的继电保护入手，改变现有继电保护准则，使得它同时具有保证电气设备安全和系统安全的双重功能；促进继电保护技术和紧急控制措施的结合，使得继电保护具有紧急控制的能力。简言之，就是使得继电保护具有系统的视角、能够快速卸载。这样的保护不同于传统保护，也不同于紧急控制，它从继电保护的角度出发，保护对象是电气设备和电力系统。

1 基于统计分析的风电潮流波动判据

1.1 酒泉风电基地的特点

酒泉风电都是以大规模风电场集中式接入电网，典型方式为风电机(出口电压 0.69 kV)通过电缆接到箱式变压器低压侧，高压侧(10 kV 或 35 kV)通过电缆接至集电线路(多为架空线)，多条集电线路汇集到母线，再通过风电场升压站接入电网(110 kV 或 330 kV)。典型风电场结构拓扑图如图 1 所示^[6]。

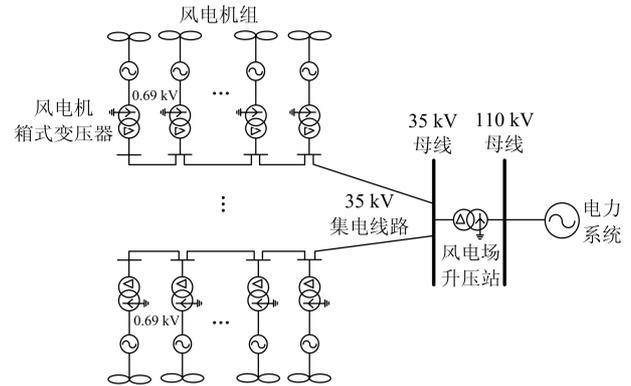


图 1 典型风电场结构

Fig. 1 Typical structure of wind power farm

1.2 风电或故障引起的潮流波动建模仿真

在 Matlab/Simulink 中建立风电场并网仿真模型并进行了研究。根据仿真结果分析，零序电压大小可以作为判定的最有效依据，因为出现了零序电压可以肯定线路发生了不对称故障；而三相电压大小和变化率是区别风速波动和故障的辅助判据。由此可以得到区分风电风速波动和故障的判据，母线零序电压大于阈值判定为接地故障，否则判定三相电压，若其小于阈值则判定为两相或三相短路。母线零序电压和三相电压判定阈值可分别设定为额定电压的 20%及 80%，有较好的适应性。

2 潮流转移及其判据

2.1 不对称潮流转移的形成过程分析

导致非故障线路远后备保护不合理动作的潮流转移有两种：(1) 对称潮流转移；(2) 不对称潮流转移。造成对称潮流转移的原因主要有：(1) 单相重合闸失败以后断路器三相跳闸；(2) 故障线路发生除单相接地故障以外其他故障后的三相跳闸；(3) 操作人员手动动作断路器三相跳闸；(4) 三相断线。原因(1)和(2)比较常见，原因(3)在调度人员进行远切控制时也比较常见，原因(4)几乎很少发生。有关对称潮流转移的识别已经有很多研究，这里不再详述其形成

过程。

造成不对称潮流转移的原因主要有:(1)故障线路单相接地故障后的单相选跳所形成的非全相运行状态;(2)断路器单相偷跳后形成的非全相运行状态;(3)故障线路单相断线引起的非全相运行状态;(4)故障线路两相断线引起的非全相运行状态;(5)断路器三相跳闸过程中各相断开速度不一致造成的短期非全相运行。原因(1)的现象比较普遍,尤其是瞬时性单相接地故障在超高压输电线路故障中占较大比例。原因(2)很少发生,并且有断路器三相不一致保护使断路器最终三相跳闸。原因(3)和(4)在超高压架空线路故障中所占比例较低,但需要考虑其造成的影响。原因(5)的过程非常短暂,可以忽略其影响。

2.2 基于本地信息的潮流转移影响域

单一线路因故障或其他原因停运后,很多线路都受到潮流转移的影响。有的线路因潮流转移过大而存在被不合理切除的危险;而有的线路潮流转移很小或者正常运行时有足够大的裕量,仍可长时间稳定运行。

基于本地信息识别潮流转移,必须合理选择研究范围,而因潮流转移过负荷存在被不合理切除可能的非故障线路都应该包含在这个研究范围之内。

基于本地信息识别潮流转移,是从非故障线路保护出发,在远后备 III 段接地或相间距离继电器启动并计时准备动作的过程中,利用模式识别技术区分潮流转移过负荷和远后备区域内故障。整个潮流转移识别过程要满足以下前提条件,从而划定研究范围,即确定潮流转移影响域。

- (1) III 段距离继电器启动条件;
- (2) 断路器三相合闸条件;
- (3) 主保护不动作条件;
- (4) 线路三相有电流的条件;
- (5) 保护启动前非系统振荡条件。

2.3 潮流转移识别的方案

判断不对称潮流转移必须同时满足式(1)中的所有条件。

$$\begin{cases} I_0 \geq 0.1I_N \text{ 且 } I_2 \geq 0.1I_N \\ \left| \arg(\dot{I}_0 / \dot{I}_2) - \theta \right| < 35^\circ \\ \arg(\dot{U}_\phi / \dot{I}_\phi) < 50^\circ \text{ 或者 } \arg(\dot{U}_{\phi\phi} / \dot{I}_{\phi\phi}) < 50^\circ \end{cases} \quad (1)$$

判断对称潮流转移必须同时满足式(2)中的所有条件。

$$\begin{cases} I_0 < 0.1I_N \text{ 且 } I_2 < 0.1I_N \\ \frac{\sqrt{(R_m - R_{m0})^2 + (X_m - X_{m0})^2}}{\Delta t_m} \leq \frac{\pi}{6} Z_{11} \\ \arg(\dot{U}_1 / \dot{I}_1) < 50^\circ \end{cases} \quad (2)$$

识别潮流转移必须在前面 2.2 节所提的 5 个基本前提条件下进行。

3 继电保护与紧急控制的分层融合

3.1 风电场预防性继电保护

风电场集电系统多采用电缆架空线混合接线,集电线路为节约成本一般采用架空线,而变压器的引出线多采用电缆。架空线高阻接地故障主要是由架空线的破损坠地、绝缘子污损、树枝接触等原因造成。电缆的高阻接地故障主要发生在电缆头,由于制作工艺不良、进水以及谐波发热引起的电缆老化等原因,电缆头常会出现间歇性电弧高阻接地故障。

中性点经小电阻接地风电场集电线路高阻接地故障的特点有:故障电流微弱,故障呈现随机性,故障电压电流非线性畸变。

针对稳态高阻接地故障检测,提出基于零序电流过零点间断的高阻接地故障检测方法。风电场内间歇性高阻接地故障主要源自电缆头的间歇性电弧放电,每次放电持续时间可能小于一个周波,所以导致零序过流保护不能予以切除,可以采用瞬时值检测与有功结合的方法。

继电保护的快速动作能够降低对风电机组低电压穿越能力的要求,有助于提高大规模风电场运行的稳定性。如果在严重短路故障前就能把线路切除,可以避免短路引起的电压降低对风电场的冲击。

高阻接地故障检测是预防性保护的前提,预防性保护可以在发生严重短路前切除故障集电线路,防止系统电压跌落,将对提高风电场运行稳定性发挥重要作用。

3.2 电网侧继电保护与紧急控制的融合方案

综合前面的分析结果,总结基于本地信息的控制策略生成流程如图 2,表示过负荷线路送电端的生成流程,受电端保护的控制策略类似,只是本端控制量为负荷。经过本地综合决策后将总体策略上传给控制中心或者区域性安全稳定控制系统作为决策参考。

一般的不对称潮流转移过负荷在故障线路完全被切除后就能转换为对称潮流转移过负荷,生成控制策略以后上传给中心系统,中心系统应能迅速予

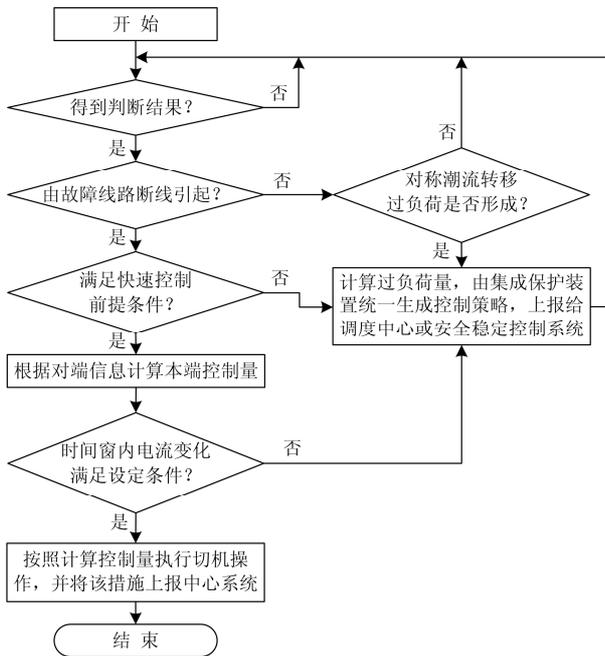


图 2 送电端保护的策略生成流程

Fig. 2 Flowchart of control strategy for sending end

以实施。

但是如果中心系统毫无反应，而非故障线路承受过负荷的时间十分有限时，如果本地存在发电出力(负荷)，可以进行逐级按轮次切机(负荷)操作(控制对象、控制轮次和控制时间提前设定)，迅速缓解过负荷状态；如果本变电站只是一个开关站、不存在任何出力(负荷)时，在实施自适应过负荷的过程中除了持续向中心系统发送告警信号和控制策略以外，如果新的保护整定时间计时结束后线路仍然过负荷，则需要保护动作断路器三相跳闸。

4 自适应过负荷保护研究

4.1 线路紧急载流能力分析

线路紧急载流能力主要受限于线路的热稳定性，过高的温度可能导致导线机械强度降低、线路弧垂增加、安全间距减小、金具及各类连接头的寿命及安全性受损等。导线机械强度、导线弧垂、金具发热及握力影响线路载流能力是三个主要因素。

4.2 基于回声状态网络的线路温度预测

出于对系统安全的考虑，在线路安全的前提下尽可能挖掘其潜在载流能力。针对线路温升的热惯性及参数的随机变化，对线路温度进行预估并自适应调整动作时间，尽可能延长动作时间，以便于调度和紧急控制采取措施消除过负荷威胁；同时，对线路热稳定状况上传给控制中心进行预警，协助消除线路过负荷运行的安全隐患。

即便架空输电线路安装了在线监控系统，其更新速度太慢，在紧急情况下难以保障线路安全，因此站内监测数据要与沿线监测数据相配合。由于线路沿线电流大体一致，故可认为沿线的焦耳吸热无差异，线路监测的导线温度差别主要来自于不同的气象条件。因此，针对沿线监测数据可能缺失的情况，基于回声状态网络的方案预测沿线温度与站内导线温度的最大温差。

4.3 线路自适应过负荷保护的构成方案

通过分析，可得线路自适应过负荷保护的逻辑：当线路沿线最高温度大于极限温度，或者线路进入紧急状态(最高温度大于紧急温度)60 min 内且满足线路温度时间积大于线路紧急热定值，则保护跳闸。在线路处于警戒状态、紧急状态及检测出沿线温度异常，将报告控制中心协助解决。

5 站域集成系统保护的实现

5.1 站域集成系统保护的功能与构成

站域集成系统保护的主要功能是对智能变电站站域内所有或部分相关的电气设备提供后备保护，主要针对同一电压等级的所有进线和出线^[7-8]。

对站域集成系统保护的要求包括：

(1) 在发生区内故障且主保护未动作情况下，站域集成系统保护可靠出口跳闸；在发生区外故障时可靠不跳闸；对站域集成系统保护中的 II 段近后备保护，区内瞬时性故障应可靠重合闸；

(2) 在系统振荡时站域集成系统保护可靠闭锁不跳闸；在系统振荡且发生故障而主保护未动作的情况下，可靠出口跳闸；

(3) 在事故过负荷情况下，站域集成系统保护可靠闭锁不跳闸。

站域集成系统保护最核心的特点为：主后备分开、后备保护集成、主保护独立。为保证可靠性，主保护和站域集成系统保护都应采用双重化配置。

站域集成系统保护的主要保护类型是距离后备和零序过流后备保护。其中，距离后备保护包含相间距离保护 II、III 段，接地距离保护 II、III 段。零序过流保护包含零序 II 段定时限、零序 III 段定时限和零序 III 段反时限。

站域集成系统保护的各个保护对象均配置单独的后备保护，但与常规保护不同的是在站域集成系统保护中，不同的后备保护之间需要相互协调配合：

(1) 同一保护对象距离后备保护、零序过流后备保护等不同类型后备保护之间互相协调配合；

(2) 不同保护对象之间的后备保护直接互相协调配合。

在智能变电站实现站域集成系统保护的功能, 整体由设备层智能终端(Intelligent Terminal, IT)、合并单元(Merging Unit, MU)和集成系统保护装置(Integrated System Protective Relay, ISPR)三大核心部件及光纤以太网、交换机等网络设备组成。后面将集成系统保护装置、智能终端、合并单元统称为站域集成系统保护 (Substation Area Integrated System Protection, SAISP)。

5.2 SAISP 的现场安装试验

SAISP 系统安装于甘肃电网 330 kV 布隆吉智能变电站, 用于保护站内所有 330 kV 出线。甘肃北部 330~750 kV 等级电网地理接线及集成系统保护装置安装地点如图 3 所示。



图 3 甘肃北部电网电力系统地理接线图

Fig. 3 Geography diagram of north Gansu grid

布隆吉变电站共接有 9 路 330 kV 线路, 分别为: 布敦 I、II、III 线, 布柳牵 I、II 线、布安六马二线、布安北四线、布安北二三线和布桥线。

布隆吉变电站为送端变电站, 直连于安六马二、安北四、安北二三风电场和桥湾变电站(桥湾变电站也连接于若干风电场), 向 750 kV/330 kV 敦煌站和柳沟牵引变电站输送功率。布隆吉站 III 段远后备保护区为下一级 330 kV 三回线敦红线。若三回敦线中的一、二回线路发生故障, 可能造成其余的二、一回线路过负荷, 由此引起连锁跳闸导致局部电网解列同时造成兰新高铁柳沟牵引变停电。布隆吉变电站安装的 SAISP 系统最大限度地利用运行线路的裕量, 同时结合甘肃河西电网新能源有功控制系统按需要切除风电场集电线路(暂时不能控制机组), 消除线路过负荷解决连锁导致的解网问题。对站域集成系统保护原型系统的试验验证了集成距离保护 III 段在事故过负荷下能可靠闭锁不动作, 灵敏性与选择性较传统后备保护有所提高。

进一步结合智能变电站实际安装需求, 在基于工控机的站域集成系统保护装置上进行了 RTDS 试验, 验证了站域集成系统保护对区内与区外故障、瞬时性与永久性故障、振荡与振荡中故障均能正确动作, 也验证了所提事故过负荷保护原理及算法的可靠性, 试验结果见表 1。仅给出布敦 I 线 50%处 0.25 s 发生 A 相永久性故障的录波见图 4。

表 1 区内区外故障试验结果

Table 1 Test results of internal and external faults

试验项目	结果
区内故障	可靠出口
区外故障	可靠不出口
瞬时性故障	可靠重合
永久性故障	可靠跳闸
不同类型故障	动作正确
不同过渡电阻故障	动作正确
系统振荡	可靠不出口
振荡中故障	可靠出口
多条线路故障	可靠出口
潮流转移过负荷	可靠不出口
潮流转移过负荷期间故障	可靠出口

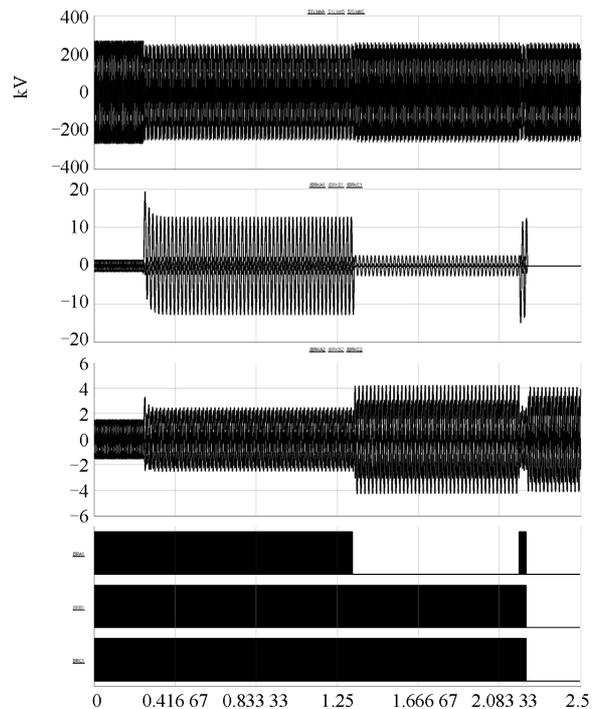


图 4 布敦 I 线 50%处 A 相永久性故障试验

Fig. 4 Test diagram of permanent fault of phase A to ground at 50% of transmission line BU-DUN I

上述试验结果表明站域集成保护系统可对变电

站多个电气设备提供可靠的后备保护，能够提高风电输送通道的可靠性。

6 结论

从酒泉千万千瓦级风电基地的开发来看，风电场以集群方式接入系统，具有大规模、高集中、远距离等特点，且要与常规电源打捆通过超特高压交直流混合送出，电网运行和风电消纳面临很大挑战。

在基于站域集成系统保护与控制系统硬件平台实现了所提出的方案，研制了系统保护试验机型，通过仿真和动模试验验证后已应用于甘肃电网 330 kV 布隆吉变电站，通过监测送电线路或断面潮流波动、潮流转移，根据故障前信息、故障后信息以及故障切除后信息，判断线路或断面发生过负荷的真实原因。为了在保证系统安全稳定的前提下保护电气设备不受损害，利用部分本地或区域信息，计算线路或断面过载量和承受时间，实现可能非全局最优但最有效的本地措施，尽快缓解紧急状态。通过对可再生能源波动、线路载流容量和变压器载流的计算，结合自适应技术和设备元件承受过载能力的曲线，自适应改变过负荷保护的定值，提高变电站、线路带负荷能力等，从而提高风电输电通道的可靠性和输送能力。

参考文献

[1] 中华人民共和国国务院. 能源发展战略行动计划(2014-2020年)[R]. 北京: 2014.
The State Council of the people's Republic of China. Energy development strategic action plan (2014-2020)[R]. Beijing: 2014.

[2] 国家能源局. 国能新能[2015] 82号 关于做好2015年度风电并网消纳有关工作的通知[R]. 北京: 2015.
The National Energy Bureau. The national new energy [2015] 82 The notice on wind power consumption related works in 2015[R]. Beijing: 2015.

[3] 董永平, 何世恩, 刘峻, 等. 低碳电力视角下的风电消纳问题[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 12-16.

DONG Yongping, HE Shien, LIU Jun, et al. Wind power consumption problem in the view of low carbon power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 12-16.

[4] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25.
DONG Xinzhou, CAO Runbin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.

[5] LACHS W R. A new horizon for system protection systems schemes[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(11): 59.

[6] 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, 144.
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, 144.

[7] 董新洲, 曹润彬, 崔柳, 等. 现代电力系统集成后备保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 21-25.
DONG Xinzhou, CAO Runbin, CUI Liu, et al. Integrated backup protection scheme in modern power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 21-25.

[8] 曹润彬, 董新洲, 王宾, 等. 数字化集成保护控制系统的实现方案[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 149-155.
CAO Runbin, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Implementation of digital integrated protection and control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 149-155.

收稿日期: 2015-06-10

作者简介:

廖志刚(1968-), 男, 学士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护运行维护及科研管理工作;

何世恩(1961-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护、可再生能源并网等。E-mail: hofstadter2003@sina.com.cn

(编辑 葛艳娜)