

电网黑启动方案关键问题探讨

张莉,王晋,卢政尧

(成都电业局,四川成都 610021)

摘要:作为四川电网的负荷中心,多种因素致使成都电网面临大面积停电事故的风险。制定切实可行的黑启动方案能保证严重停电事故后恢复控制的有效性。从电源恢复、路径寻优、负荷接入、安全校核、继电保护和方案评估等角度出发,就方案编制中存在的问题进行了针对性分析并提出相应改进建议。为使方案的制定方式由离线决策转变至在线实时决策,提出开发黑启动辅助决策系统将有利于调度运行部门正确处置大停电事故。在此基础上,探讨了黑启动辅助决策系统的体系架构和功能构成。

关键词:黑启动; 电网恢复; 安全校核; 方案评估; 辅助决策系统

Abstract: As the load center of Sichuan power grid, several factors will cause Chengdu power grid to face the risk of large-scale service interruption. Drawing up the feasible black-start schemes can guarantee the effectiveness of restoration control after the severe service interruption. As viewed from the power source restoration, path optimization, load connection, safety check, relay protection and scheme assessment etc, the pertinent analysis has been carried out and the relevant improvement suggestions towards the problems of scheme compilation are proposed. In order to make the scheme compiling mode convert from off-line decision making to on-line real-time decision making, it is put forward that developing a black-start assistant decision-making system will benefit the dispatching and operation departments to handle the service interruption correctly. On this basis, the architecture and functions of black-start assistant decision-making system is discussed.

Key words: black start; power grid restoration; safety check; scheme assessment; assistant decision-making system

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0025-06

0 引言

在电力系统发生大面积停电事故后,切实有效的应急方案能够最大程度地降低大停电造成的损失,对于确保社会秩序稳定和经济正常运行具有十分重要的现实意义^[1]。“黑启动”是电网大面积停电事故应急体系中最为关键的环节之一^[2]。以成都电网为背景,从电源恢复、路径寻优、负荷接入、安全校核、继电保护和方案评估等角度^[3-9]出发,就方案编制中存在的问题进行了针对性分析并提出相应改进建议。

近年来,成都电网负荷密度不断增加,短路电流水平逐年增长。随着部分500 kV变电站及其配套工程的投运,网内多个220 kV站短路电流已超过开关遮断容量。个别500 kV站主变压器跳闸将引发局部220 kV网络中各站母线电压跌落达20 kV以上,若无法保证110 kV及以下电网无功平衡,电压

跌落将更为严重,可能造成局部电网电压崩溃。在高峰负荷时段,网内许多主变压器容载比很低,重载及过载线路较多,系统稳定储备不足。综上所述,多种因素使成都电网存在因重要单一元件故障引发连锁性故障从而导致系统发生大面积停电事故的可能性。

针对预先编制的《电网黑启动方案》所存在的各种问题,阐述了黑启动方案的制定方式由离线决策逐步转变至在线实时决策的必要性,以适应电网大停电发生后有效辅助电网调度运行部门作出相应动态决策的需要,并提出了开发黑启动辅助决策系统对于提高调度运行部门应对大面积停电灾难的能力将具有重要现实意义。在此基础上,探讨了黑启动辅助决策系统的体系架构和功能构成等主要内容。

通过探讨当前黑启动方案编制中的一些关键问题,以期为进一步做好电网黑启动工作提供一种新思路。

1 电源恢复

1.1 黑启动电源的选择

为获得较满意的恢复效果,选择黑启动电源时应综合考虑下列因素:①选择调节性能好、启动速度快和具备进相运行能力的机组;②优先选择直调电厂作为启动电源;③尽量选择接入较高电压等级的电厂;④有利于快速恢复其他电源的电厂;⑤距离负荷中心较近的电厂。

图1至图3为成都电网各子网拓扑图。在子网1,黑启动电源为紫坪铺水电厂,现役装机规模为 4×190 MW,调节库容大,可作系统主调频电源,对保证恢复过程中的频率稳定可发挥积极作用;在子网2,黑启动电源为雨城水电厂,现役装机规模为 3×20 MW,由于机组装机容量较小,故应尽快创造条件与相邻子系统并网运行;在子网3,黑启动电源为冷竹关和小关子水电厂,现役装机规模合计340 MW,调节库容较大,完成自启动后可通过临兴线向隆兴站并网电源硃碛提供启动电能。

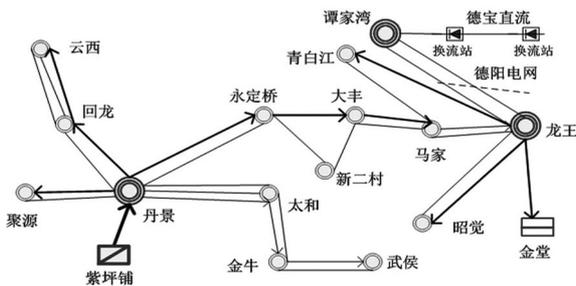


图1 子网1恢复路径

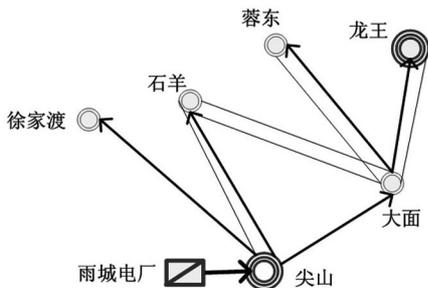


图2 子网2恢复路径

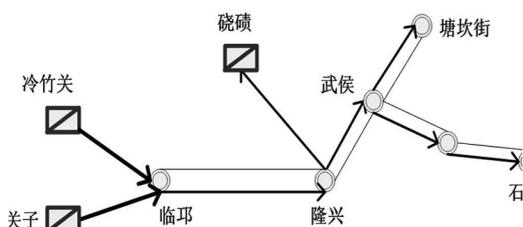


图3 子网3恢复路径

1.2 电源恢复策略

成都电网周边丰富的水电资源为系统黑启动带来了极大的便利,但同时应注意不能完全依赖大型水电恢复系统。除严格遵循依靠黑启动电源尽快启动周边无自启动能力机组的原则之外,考虑到网内由高电压等级恢复至低电压等级耗时较长并延误部分重要负荷恢复的现实情况,可选择外部电源担任系统黑启动电源并依靠小容量电源恢复低电压等级网络,以完善电源恢复策略。

外部电源包括省网内部与成都电网相邻的正常运行子系统和外电入川通道。相邻子系统向成都电网提供启动电能,能有效解决自启动电源与待启动电源间电气距离较远(如子网1)和电源发电容量有限(如子网2)的问题,将加快相关子系统的恢复速度。外电入川通道传输功率较大,如德宝直流,通过谭家湾站经由两条500 kV线路即可恢复龙王站,无不同电压等级间的变换,进而可向金堂电厂提供启动电能,恢复其1200 MW的发电能力,由此缩短电网的恢复时间。然而,如图1所示,若以紫坪铺水电站向金堂火电厂提供启动电能需恢复5座变电站,在220 kV和500 kV电压等级间变换两次。经综合比较,借助外部电源能够获得最佳的恢复效果。

同时,为获得最佳的恢复效果,黑启动电源启动各子系统的同时也应充分挖掘网内并入低电压等级电网小电源的发电能力。具备自启动能力的小电源启动后立即向周边重要负荷供电;不具备自启动能力的小电源应配备柴油发电机,或在恢复高电压等级节点和线路时,侧重为启动网内小电源创造条件。

成都西北部电网内的110 kV变电站有数量可观的小型水力发电厂并网,单机容量小、启动时间短,带低负荷运行时稳定性较好,配备小容量柴油发电机即可作为机组启动电源。为此,在相关220 kV变电站得到恢复后,进一步向下延伸启动并网小电源,可加快局部110 kV供电网络的恢复速度,对恢复该局部的重要负荷比较有利。

2 电网黑启动路径

2.1 最优路径搜索

目前,调度员主要依据电网运行经验建立恢复路径,尚缺乏足够的理论支撑辅助其作出科学决策。黑启动最优路径搜索应重视两个大方面的结合:将

调度运行经验、理论方法和电网分析计算相结合;将路径搜索算法中的单步最优与全局最优相结合。

调度运行经验在最优路径搜索中的作用举足轻重。然而,完全依靠其建立的恢复路径虽然可行,但并不一定最优。为此,需要引入符合电力系统运行实际的理论方法。基于安全校核和保护动作值整定等电网分析计算结果,修正运用理论方法得到的恢复路径。例如,对于投入高抗或控制合闸前节点运行电压均无法将操作过电压倍数降低到规定范围内的路径,应将其从候选路径中予以排除。

为获得单步和全局恢复的最优性,便对黑启动最优路径搜索模型提出了更高的要求。单步最优保证每一次恢复控制可获得相对最好的效果,其包括两项关键环节:为发电厂、变电站和输电线路等电网元件赋予权重值,准确表征各元件在恢复过程中的重要性;以某已恢复节点作为起始点,运用恰当的路径辨识方法在候选的未恢复节点中选择下一步应恢复的节点。全局最优要求在满足各项约束条件的前提下达到预先设定的恢复目标。首先,将电网黑启动过程划分为若干恢复阶段。然后,为各阶段设定相应的目标函数和约束条件集,以满足不同阶段的恢复需求。最后,求解最优路径搜索模型。

2.2 试送失败和无法试送

在实际恢复过程中,可能因电力设备故障或其他意外导致试送失败。水电厂水位不符合要求和变电站直流电源耗尽将导致设备不具备投运条件。由设备故障或不具备投运条件导致预定恢复控制无法实施的问题,应从恢复路径实时选择的角度加以解决。较理想的方式是根据系统实时工况和运行参数计算得出恢复路径,即要求黑启动方案的制定和生成需从离线决策转变至在线实时决策。采用在线实时决策方式后,可待本次恢复控制成功及相关运行参数明确后,再给出下一步恢复路径,从而保证恢复控制的实效性。

2.3 负荷接入方案

除电源和电网的恢复之外,地调应重视制定一套具有较高可执行性的负荷接入方案,以满足不同恢复阶段和系统不同运行状态对负荷接入的刚性要求。为此,应详细列出拟恢复重要负荷的优先顺序及相应数量。

预先确定各类重要负荷的恢复优先顺序,有助于理清其相对重要性。针对预先设定的黑启动路

径,确定拟恢复的 110 kV 变电站,编制详细的负荷接入方案,具体内容如下:各站所带重要负荷、接入重要负荷的线路名称和负荷量。重要负荷安排原则应优先保证各级电力调度机构、通信部门、党政军机关、重点厂矿企业的保安负荷等的供电;应避免恢复电铁、电弧炉等冲击负荷。

明确各重要负荷的数量,以保证恢复重要负荷的同时确保系统安全运行。能够在符合电源恢复和网架结构等系统实际恢复情况的前提下较准确地接入符合约束条件的负荷。在系统黑启动期间,由于电源出力限制和网架结构薄弱等原因,应严格控制负荷接入量。根据电网运行实际并参照已有经验,原则上对单次接入负荷量和接入负荷总量分别占已恢复发电容量的比重进行限制,即可确保负荷接入不会对电网运行产生过大扰动且系统具备足够的发电裕度以满足后续恢复的需要。应充分考虑不同类型负荷的实际特性,通过数字仿真就其投入时对系统产生的影响进行计算和分析评估。

恢复过程中系统接入负荷时主要考虑如下约束条件。

$$\sum_{i=1}^n (P_{Gi}^{\max} - P_{Gi}) \geq \xi P_{sum-load}^{rt} \quad (1)$$

$$P_{load} \leq \eta \sum_{i=1}^n P_{Gi}^{\max} \quad (2)$$

式中 P_{Gi} 和 P_{Gi}^{\max} 分别为发电机组 i 的实时有功出力及其额定功率; $P_{sum-load}^{rt}$ 为系统的实时总负荷; P_{load} 为单次接入的负荷数量; ξ 和 η 分别为系统旋转备用率和单次接入负荷占系统额定发电出力的比例,视系统恢复情况取值。

3 方案的安全校核

目前,黑启动方案的安全校核主要针对电网恢复过程中的频率稳定、电压稳定、操作过电压和机组自励磁等问题,具体包括机组并网、空载线路合闸和负荷接入等恢复控制,尚未涉及不同子系统间的同期并网过程。与上述恢复控制不同,子系统间的并网过程将使潮流在全网内重新分布,可能造成部分节点母线电压越限、输电线路重载甚至过载,其潜在威胁不亚于单个电力设备的投入对系统产生的影响。若相邻的两个子系统在强弱程度上存在差异,并网过程产生的影响对强、弱系统而言,分别等同于小扰动和较大的冲击。在电力系统黑启动过程中,

表 1 子网 2 继电保护整定计算结果表

线路名 / 故障名	突变量启动电流 / A	零序启动电流 / A	两相短路相电流 / A	单相短路零序电流 / A	说明
雨城 - 尖山 / 尖侧 (单机)	250	120	21 521	13 210 8 200	尖山接入 尖山未接入
尖山 - 大面 / 大侧	240	120	20 701	7 448 5 213	大面接入 大面未接入
尖山 - 石羊 II 线 / 石侧	240	120	21 736	10 000 6 600	石羊接入 石羊未接入
尖山 - 徐家渡 / 徐侧	250	120	15 200	4 482 2 689	徐家渡接入 徐家渡未接入
大面 - 龙王东线 / 龙侧	240	120	24 984	11 106 7 128	龙王接入 龙王未接入
大面 - 蓉东北线 / 蓉侧	240	120	15 982	4 744 3 225	蓉东接入 蓉东未接入

由于电源结构不完善,网架结构薄弱,存在部分较弱的子系统,且安全自动装置的退运进一步降低了此类子系统抵御干扰的能力。因此,在已有安全校核工作的基础上,有必要运用数字仿真手段就子网间的同期并网过程对系统产生的影响进行计算和分析评估。为使数字仿真符合电力系统运行实际,需在仿真环境中应用自定义模块设计同期并网断路器的控制逻辑。

在仿真过程中,主要校核并网前后已恢复节点母线电压的提升或跌落程度是否在电压波动允许范围内,以及关键线路是否出现重载或过载的情况。校核结果将为采取诸如合理选择并网点、调整负荷接入方案以及控制并网前节点的运行电压等应对措施提供决策依据。

4 继电保护配合计算分析

对黑启动方案进行正确完善的继电保护整定计算,将切实保证恢复过程中的系统安全。依照以下原则进行计算:针对各子系统分别进行整定计算;为简化计算,只考虑启动过程中新投运线路末端发生故障的情况,故障类型主要考虑发生概率最大的单相短路和短路电流水平最小的两相短路;计算时考虑线路末端变电站接入和未接入两种情况。

黑启动过程中继电保护装置的运行应满足下列要求:根据整定值,短路电流均可满足保护装置启动电流的要求;相间故障时,依靠距离保护保证灵敏度;接地故障时依靠接地距离保护、零序 II 段保证灵敏度,经较大过渡电阻的接地故障时,则依靠零序

保护末段动作切除故障;线路两端所有保护(包括纵联保护)正常投入。

以子网 2 为例,相应的继电保护整定计算结果如表 1 所示。

计算说明“突变量启动电流”和“零序启动电流”为线路保护装置启动所需最小突变量电流和零序电流;短路电流已归算至实际电压等级。

5 方案评价

对黑启动方案进行评价的目的是在若干可行方案中选出最优实施方案,并找到影响方案评价值的敏感因素,为调度员修正方案内容和改进方案的制定方法提供理论依据。黑启动方案评价是在确定的评价指标体系下运用数学方法对方案有效性进行分析的过程。影响评价结果的两项关键因素为评价指标体系和数学分析方法。

建立评价指标体系时,首先要建立明确的评价准则;其后,要针对每一项评价准则分析指标中应包含的因素,确定相应的实用指标,准则和指标间可以是多对多的关系;最后,若指标间存在重叠,则考虑将重叠的指标进行合并或删除其一。此外,在设计具体的指标时,还应遵循各项指标均可获取的原则,不选用无法通过预先计算求取的评价指标,以免造成方案评价结果的可信性降低。

在运用数学分析方法进行计算时,应注重将主观分析方法和客观分析方法相结合,充分利用两者的优势,并有效融合依据不同准则所设计的指标,以获得最佳的评价效果。同时,应明确方案评价属于

综合评价技术的范畴,最终目标是建立如式(3)所示的综合评价函数,以求得方案的综合价值。通过灵敏度分析得到对各套方案评价具有最大影响的关键指标。

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i \quad (3)$$

式中 x_i 和 λ_i 分别为第 i 项指标计算值及其权重值。

6 黑启动辅助决策系统

目前,《电网黑启动实施方案》由调度员在《电网黑启动方案大纲》的基础上,根据电网年度运行方式修编制定,工作量较大。在方案编制过程中,往往依经验确定恢复路径,缺乏理论依据。同时,尚未对所制定方案进行有效性评价。最大的问题是,针对预设系统运行方式而编制的《黑启动方案大纲》在运行方式变化后针对性和有效性均不足,因而缺乏实际的指导意义。然而,从电网调度运行的角度出发,能够辅助调度员对电网故障后的恢复控制提供决策支持的手段非常重要。因此,有必要开发一套适应电网大停电事故后恢复控制需求的黑启动辅助决策系统(以下简称“决策系统”),使《黑启动方案大纲》随系统结构和运行方式变化而作出相应更新,由此提高电网调度运行部门应对大面积停电灾难的能力,保证大停电发生后制定的恢复控制措施切合实际。

决策系统应兼顾离线分析和在线决策的需要。

①离线分析:用于对黑启动方案进行研究,也可作为培训调度员制定黑启动方案的平台。主要功能包括:可人工设定大面积停电后的系统状态;自行设定电源开机情况,建立恢复路径,形成恢复方案;能完成安全校核、继电保护配合整定计算和方案评价。
②在线决策:用于电力系统崩溃实际发生后黑启动方案的在线制定与生成;基于 SCADA 实时采集到的数据,分析电网拓扑和实际运行工况,判定停电区域,计算并生成相应的恢复控制方案,显示单步恢复过程,当相应恢复控制完成后,给出下一步应执行的操作。为实现离线分析和在线决策并作为各功能模块的支撑,后台数据库应分为非实时库和实时库。总体上,数据库负责存储实现各模块内部算法所需的电网元件基本参数和系统运行参数。实时库应与 SCADA 数据库通信,并具备较高的可维护性。为保证各功能模块的运算速度并提高决策系统的运行效率,需设计合理的数据库结构。

为制定出完善可行的黑启动方案,决策系统应包括以下基本功能:电网拓扑分析、电源恢复方案、恢复路径搜索、负荷接入方案、潮流计算、恢复控制安全校核、方案有效性评价、继电保护配合整定计算和最优方案显示等。决策系统的功能流程如图 4 所示。

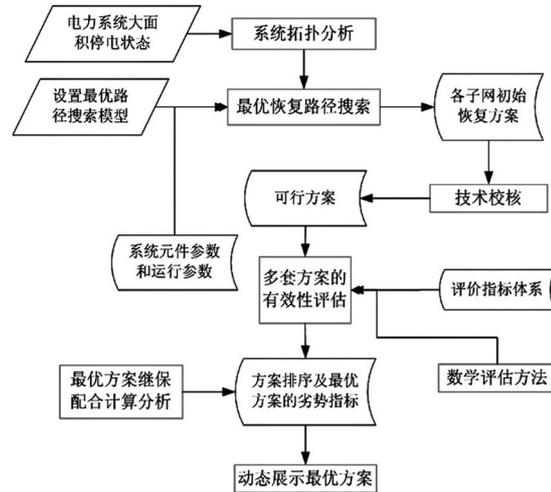


图 4 黑启动辅助决策系统功能流程图

①根据电力系统实时运行状态,通过拓扑分析确定电网大停电区域,保证恢复方案的针对性。②根据大停电后的电源开停情况,分析各停运机组的启动特性,通过算法排定其恢复次序,形成电源恢复方案。③基于电源恢复方案,通过路径寻优算法建立恢复路径。④根据机组、变电站节点和网络的恢复情况,跟踪机组有功出力 and 系统实时总负荷,在约束条件下计算允许的负荷接入量。⑤基于网架结构、电源恢复和负荷接入等情况,对已恢复电网做潮流计算,为安全校核提供基础参数。⑥运用工程实用判据进行自励磁校核,按电源点单机启动考虑;针对黑启动电源恢复至首个被启动电源间的路径,分别考虑断路器有、无合闸电阻两种情况,计算合空线沿线最高统计过电压,求出操作过电压倍数,给出末端节点投入高抗和首端运行电压的建议值;对并网过程中敏感节点的母线电压和关键线路的传输功率进行校核;若参数超限,则发出告警信息并显示超限元件及程度。⑦对通过安全校核的可行方案进行有效性评价,得出方案综合价值;分析影响方案评价的关键指标。⑧针对最优方案,完成继电保护整定计算。⑨在电网接线图中直观展示最优方案的执行过程。

7 结语

电网黑启动工作涵盖系统运行的方方面面。黑

启动方案的编制是一项复杂的系统性工作。需统筹考虑多方面问题才能切实保证黑启动方案的有效性。为辅助电网调度运行部门正确处置大面积停电事故、确保恢复控制的实效性,方案的制定方式应由离线决策逐步转变至在线实时决策。开发黑启动辅助决策系统是适应上述需求的途径之一。通过探讨当前黑启动方案编制中的一些关键问题,以期为进一步做好电网黑启动工作提供一种新思路。

参考文献

[1] 中华人民共和国国务院. 国家处置电网大面积停电事件应急预案[EB/OL]. 2006. http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/24/content_168998.htm.

[2] 赵炜炜, 张建华, 尚敬福, 等. 电网大面积停电应急评价指标体系及其应用. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 27-30.

[3] 周云海, 唐立春, 胡翔勇. 黑启动的定性推理模型[J]. 中国电力, 2008, 41(11): 10-13.

[4] 袁川, 刘俊勇, 张国松, 等. 东西关电厂作为南充遂宁

电网黑启动电源点的可行性分析[J]. 四川电力技术, 2012, 35(1): 48-53.

[5] 林振智, 文福拴. 基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 11-15.

[6] 杨可, 刘俊勇, 贺星棋, 等. 黑启动中考虑动态过程的负荷最优恢复[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 88-92.

[7] 刘连志, 赵灿, 韩振明. 黑启动过程中操作过电压分析[J]. 四川电力技术, 2009, 32(3): 28-31.

[8] 刘映尚, 张碧华, 周云海, 等. 黑启动过程中继电保护和自动装置的特性和运行[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 25-28.

[9] 刘艳, 顾雪平. 评估黑启动方案的层次化数据包络分析方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 33-38.

作者简介:

张莉(1962), 女, 工程师, 从事电网运行管理和负荷预测工作;

王晋(1978), 女, 工程师, 从事电力系统继电保护工作;

卢政尧(1957), 男, 高级工程师, 从事电网调度运行管理工作。
(收稿日期: 2012-05-22)

(上接第9页)

[6] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.

[7] Chai Chompoo-inwai, Wei-Jen Lee, Fuangfoo P, et al. System Impact Study for the Interconnection of Wind Generation and Utility System [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(1): 163-168.

[8] HA L T, SAHA T K. Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network [C]. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, Vol 2, Jun 6-10, 2004, Denver, USA, 2004: 2251-2256.

[9] SMITH J, BROOKS D. Voltage impacts of distributed wind generation on rural distribution feeders [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, Vol 1, Oct 28-Nov 2, 2001, Atlanta, USA, 2001(1): 492-497.

[10] Le Thu Ha, Tapan Kumar Saha. Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network [J]. IEEE, 2007.

[11] Magnip P. Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks [C]. IEEE power engineering society summer meeting 2002.

[12] 于德龙, 赵海翔, 曹娜. 风电场接入地区电网的电压

问题分析[J]. 中国电力, 2006, 39(6): 10-14.

[13] 张红光, 张粒子. 风电场接入电网的安全稳定分析[J]. 中国电力, 2007, 40(5): 105-109.

[14] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 陈默子, 戴慧珠. 风电接入对电力系统影响的研究[J]. 电网技术, 2006, 48(5): 38-44.

[15] 杨国良, 李惠光. 垂直轴永磁同步风力发电系统建模及瞬时功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 29(5), 39-42.

[16] 林莉, 孙才新, 王永平, 等. 大容量风电场接入后电网电压稳定性的计算分析与控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 41-46.

作者简介:

赵海岭(1984), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为风力发电及并网技术、微机继电保护;

王维庆(1959), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事风力发电技术、大规模风电并网及微机继电保护等方面的研究工作;

姚秀萍(1959), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 国家电网公司专家, 研究方向为电力系统稳定与控制、新能源并网技术;

常喜强(1977), 男, 高级工程师, 国家电网公司专家, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、风电等新能源技术。
(收稿日期: 2012-04-16)