

基于风电汇集地区无功系统优化的研究

李朝阳¹, 宋朋飞³, 苗长越¹, 常喜强², 樊国伟², 张 锋², 王 衡², 亢朋朋³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006;
3. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:在对风电场汇集站无功电压控制研究的基础上,针对目前风电场没有建立统一的 AVC 控制系统,风电场仅依靠厂家提供的电压控制手段进行电压控制的现状,提出了基于风机、风电场汇集站无功补偿设备、动态无功补偿设备 SVC/ SVG 的风电场无功电压管理系统(VMP)。对风电场无功电压进行协调控制和管理,提高风电场无功电压运行水平,满足风电场无功运行要求,进而为风电场群、风电场与电网统一协调无功电压控制奠定基础,通过现场试验验证了该系统的合理性和有效性。

关键词:风电场; VMP; 协调控制; 电压控制

Abstract: Based on the research of reactive voltage control of wind farm collecting stations, because there is no unified AVC control system for wind farms at present and the voltage control of wind farms is only controlled by the voltage control means provided by the manufacturers, a wind farm reactive voltage management system (VMP) is proposed to control and manage the reactive voltage based on the reactive power compensation equipment of wind turbine and wind farm collection station and the dynamic reactive power compensation equipment SVC/ SVG. It improves the operation level of reactive power and meets the requirements of reactive power operation. The rationality and effectiveness of the proposed system are verified through the field test.

Key words: wind farm; voltage/var management platform(VMP); coordinated control; voltage control

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)06-0005-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.06.002

0 引言

随着风电大规模的开发和利用,国内建立了以 49.5 MW 或 200 MW 的多个风电场,风电场汇集后统一接入电网,而每个风电场和风电场汇集站均接在电网的末端,远离负荷中心,网架结构薄弱,短路水平较小,在风电出力较大、较小时电压控制难度大,电压控制与网架结构强弱、风机数量、风机类型、风电场的无功补偿设备、升压站变压器抽头有关,需要对这些设备统一协调控制和管控,形成单个风电场无功电压综合控制,建立了基于风机和单个风电场内电压调控装置的统一协调控制系统(VMP 系统),对风电场无功电压进行协调控制和管理,提高风电场无功电压运行水平,满足风电场无功运行要求,进而为风电场群、风电场与电网统一协调无功电压控制奠定基础,通过现场试验验证了该系统的合

基金项目: 自治区自然科学基金(2013211A006); 国家 863 计划(2013AA050604)

理性和有效性。

1 风电场无功电压控制现状

风电场的无功电压控制应按照分层和分区基本平衡的原则进行控制,并满足风电场在各种工况下的运行要求^[1-3]。风电机组应具有一定的无功容量,至少不低于风电机组在额定有功功率输出时超前 0.95 至滞后 0.95 功率因数所确定的无功容量范围。具有控制其发出的无功功率在无功容量范围内动态可调的能力。风电场要充分利用风电机组、无功补偿设备进行调压。

传统的无功调压方法主要是由电网调控中心根据往年的经验,按照夏大、夏小、冬大、冬小及平常的高峰低谷期进行电量的分配和对潮流的分布调试。并根据每年新增的负荷对一个地区进行电量的调控。这在大体上是可以的,但是对于今天日益复杂的电网系统来讲就存在精确性的问题。在科技日益

发达的今天,稳定性、安全性、精确性是对一个电网的考验^[4-7]。目前的弊端主要表现在以下几方面:

1) 现在给定的数据一般是近几年的经验推算的,并不是实时的数据,这方面没有达到精确性的目的,对小的负荷来说没有什么影响,但对大负荷地区来讲当超过所给定的最大极限时,会给调压系统特别会对电网造成巨大安全隐患。

2) 现在的调控中心一般是24 h监控,不允许工作人员离岗运行,这在无形中给人造成的压力是注意力不高,精神状态不好。当工作人员精神状态不好时,注意力容易下降,一点小的失误操作都可能会造成整个电网的运行事故。

3) 各个风电场之间,没有一个统一的系统对电网的无功电压进行统一调控,从而也造成无功电压的调节处于一个比较困难的阶段;而且每个风机的运行情况也并不一致,从而对风电场的电压调节带来了一定的困难。各个风电场没有一个统一的电压调控系统,导致内部之间比较混乱,即使出现事故也经常出现“踢皮球”现象,找不到真正的事故原因。使电网的安全性没有凸现出来,也没有达到经济性效果。

基于以上的问题,了解到现在的电压调节系统还存在着不足,还需要进一步的改进和研究。下面提出了一种新型的无功电压管理控制系统——VMP,运用现在的智能控制手段对各个风电场汇集站进行控制,并且对每台风机取监测点,以实现自动对风电场电压进行补充和投切。并对各个汇集站的电压进行一个合理的调控,确保电网安全稳定地运行。

2 风电场无功电压控制手段及无功电压控制影响因素

目前风电场电气部分主要由风机、变压器、无功补偿装置组成。由于电网各点的电压调整不同于频率调节,可由电网统一进行;又由于电网各点电压主要反映该点的无功功率的平衡问题,所以电压调节方式主要有集中补偿和分散补偿。风电场补偿方式一般要根据具体情况而定,由于所处的环境和条件不同,选取的情况也不一样。最主要的目的是补充无功,达到所需要的补偿量。现在也有很多风机厂家根据需求方的技术要求及国家给出的技术和资金的支持,从风机入手,使风机的技术水平到达了一个

高的平台,使现在的风机可以吸/发无功,从而达到改善网络负荷的功率因数和调整电压偏差的目的;现在经常用到的是并联电容电抗器,调节变压器的分接头,增加静态无功装置(SVC/SVG)对电压进行调整以达到补偿无功的目的^[8]。

2.1 风电机组

随着风电技术的发展,风电机组从原来的不具有无功控制能力发展到能够输出一定的无功。目前双馈式异步风力发电机组和永磁直驱风力发电机组是主流的机型。双馈风电机组接入系统如图1所示,双馈式异步风力发电机组通过控制实现有功/无功的解耦,具备一定的动态调节无功输出的能力。

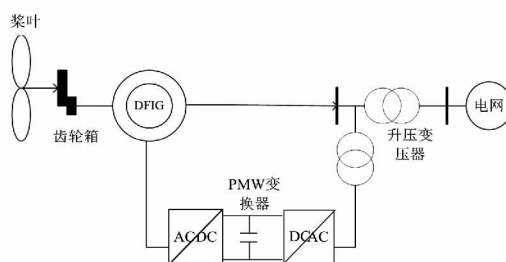


图1 双馈风电机组及其接入系统

永磁直驱的接入系统如图2所示,永磁直驱风力发电机组由于通过全容量与电网连接,则能够灵活地对无功进行控制。

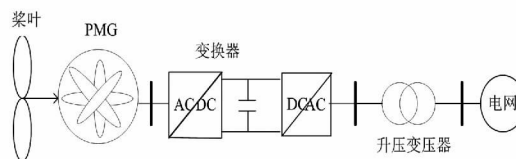


图2 永磁直驱风电机组及其接入系统

这两种风力发电机组都具备以恒电压模式工作的能力,可以在一定程度上实现对无功和电压的控制。

2.2 并联电容电抗器和动态无功补偿设备

电容器的主要作用是提供无功以达到调节电压的目的。然而电容器的补偿能力主要受母线电压的影响,发出的无功功率与电压的平方成正比即

$$Q_c = V^2 / X_c \quad (1)$$

式(1)中可以得出当电网传输的无功偏多,而补偿点的电压又比较低的情况下,需要吸收大量的无功进行补偿用来使电压恢复到额定水平;此时电容器发出的无功反而随电压的下降成平方关系锐减,促使电压值变得更小^[9]。当电网电压不足时,电网发生故障或由于其他原因导致电压降低的情况

下,电容器所提供的无功不足导致电压继续下降,将会造成电网处于危险的状态。

静止无功补偿装置(SVC/SVG)具有快速、连续、双向调节无功的能力。SVC/SVG在输电网、配电网中起到了减少风电场受随机风速扰动引起的电压波动和提高阵风扰动引起的电压稳定的作用。随着技术的发展以及用户对电网安全认识的提高,目前这种动态无功补偿装置已经得到了普遍的使用。

2.3 变压器及其分接头

变压器的作用实际上就是通过改变分接头来改变变压器的变比,正是通过改变高低压侧两端的阻抗、导纳的大小来改变其两侧的电压。

普通变压器的分接头只能在停电的状态下调整,它不能改变负荷变化二次侧电压的变化幅度,而且其电压调节范围也较小,靠普通变压器的分接头无法满足调压要求。这时可以借助有载调压变压器进行调压,在电力网电压变化时,不停电的改变变压器的分接头满足调压要求,调节速度也比较快,改变一档分接头需 2~5 s,而且便于实现自动化,是一种有效的调压措施。利用有载调压变压器调压一般仅使用局部个别地区和单位的电压调整,而不一定完全适用于系统调压,只有当系统中无功功率电源容量大于无功负荷时才有利。

2.4 无功电压影响因素

系统电压变化量可以表示为

$$\Delta V = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{V} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,系统电压受两个因素的影响:一个是 PR/V 分量;另一个是 QX/V 分量。进行无功补偿调压时要根据电网的实际运行情况来看定。当在低电压线路中,一般导线横截面积比较小,此时线路的电阻远大于电抗,负荷所占的比例就高,在公式 ΔV 中, PR/V 所占的比例较大;在高压线路中,情况恰恰相反。

此时需要增加系统中无功功率或改变系统网络参数,如发电机、并联电容器、电抗器;或者改变有功功率和无功功率的分布进行调压,如改变变压器分接头调压。

2.5 系统无功调节

当前,风电场风机普遍使用的调节无功电压的措施如图 3 所示。

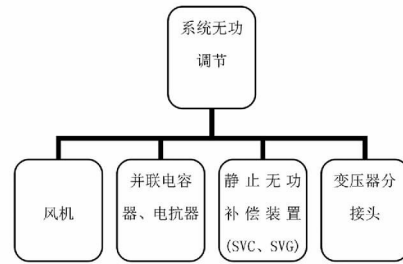


图 3 调节无功电压的措施

系统优先考虑风机调压,因为它不需要附加设备,而是充分利用发电机本身具有发出或吸收无功功率的能力,从而不需要附加投入^[6-8]。在供电线路不长,电压损耗不大,仅使用发电机调压就能满足要求。对于通过多级电压输电的负荷,仅用发电机调压,往往不能满足负荷的电压要求。在此种情况下,系统可以并联电容器、电抗器来补偿无功,提高电网的功率因数,减少电网的电压损耗,提高母线的电压水平。如果还不能满足系统所需要的无功,这时可以通过系统调节 SVC/SVG 来进行无功电压的补偿;SVC/SVG 向负荷点就近提供无功电压,减小系统流入的无功功率,这样可使网络产生的压降减小,达到补偿电压的目的。此时,如果还不能达到系统所需要的无功,这时系统可以通过改变变压器的分接头进行调压,从而改变变压器变比,以实现调压目的。必须强调的是:在系统无功不足条件下,不易采用调整变压器分接头的办法来调压。因为当某一地区的电压由于变压器分接头的改变而升高后,该地区所需的无功功率也增大了,这就可能扩大系统的无功缺失更大,从而导致系统的电压水平进一步的降低。从全局来看,这样做是不合适的。

对于风电场调压问题,需要根据具体的情况对可能采用的措施进行技术经济比较后,才能找到合理的答案。

3 风电场无功电压管控系统(VMP 系统)

在此情况下,提出了一种控制系统——无功电压管控系统(voltage/var management platform, VMP), VMP 为风电场电压/无功功率自动控制系统,用于 MW 级风机风电场的并网点电压控制和无功功率自动补偿。控制系统的模型如图 4 所示。

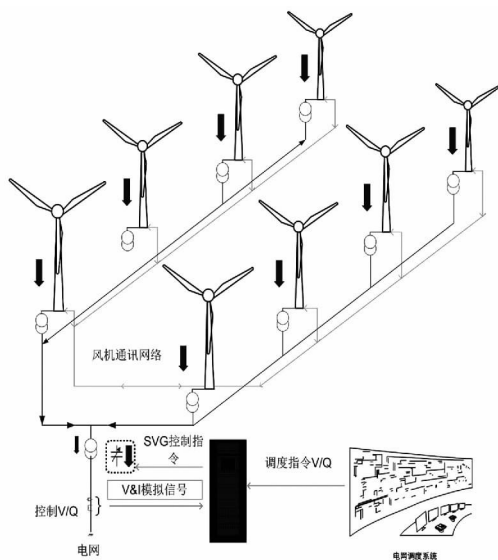


图4 VMP系统

VMP系统在风电场每台风机都有监测点接入。在暂态运行时,当电压遇到故障时,VMP系统通过控制SVC/SVG无功补偿措施进行补偿,当故障结束后能够使无功电流迅速恢复到正常水平,实现了整个风电场低电压穿越。从而体现了VMP控制系统调节速度快、精度高、逻辑准确。

VMP系统有多种控制模式,如恒电压控制、恒无功功率控制、恒功率因数控制等,这几种控制模式的特点是控制精度高、响应时间短。保证风电场无功补偿装置的动态部分自动调节,确保电容器、电抗器支路在紧急状况下能被快速正确地投切。

VMP控制方式有远程主从控制和就地手动控制。远程主从控制可以通过计算机等智能设备从远方进行实时的操作和监控,具有操作方便和速度快的优点;另一种方式利用就地控制装置上的开关或按钮,以人工手动方式实现对设备启/停操作控制,由现场工作人员进行手动控制操作,两种控制方式配合使用达到最优控制效果。

4 现场试验验证

为了验证所提出的VMP系统的有效性和合理性,在某地区某风电场进行试验验证。该风电场的装机容量为174 MW,由116台金风的1.5 MW风机组成,无功补偿容量为52 Mvar,其中30 Mvar由SVC补偿,22 Mvar由SVG补偿。控制拓扑图如图5所示。

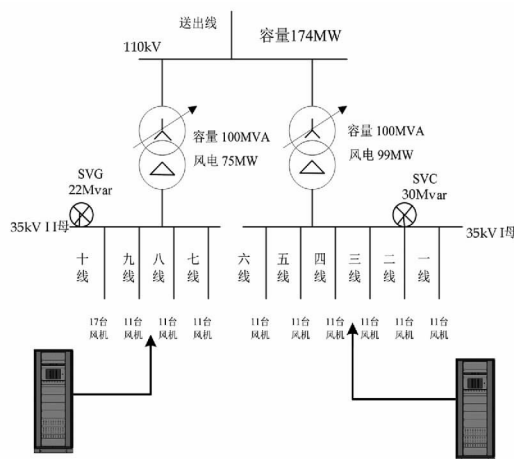


图5 VMP系统控制拓扑结构

针对上述风电场几种电压无功电压补偿措施所存在的不足情况,采用VMP系统进行无功电压的补偿和调压,并在恒电压的控制模式下进行试验。

为了试验进程能够稳妥,确定VMP系统投运步骤如下:

第1阶段:在1号主变压器运行时,使SVC处于零输出的热备状态,投入第1套VMP系统,控制风电场1号主变压器二次侧的电压稳定。观察VMP 1个星期的运行情况,如果VMP系统运行稳定则完全退出SVC,保持VMP系统运行并持续观察设备的调节性能和稳定性情况。

第2阶段:在2号主变压器运行时,使SVG处于零输出的热备状态,投入第2套VMP系统运行,控制风电场2号主变压器二次侧的电压稳定,观察VMP 1个星期的运行情况。若VMP系统运行稳定则完全退出SVG,保持VMP系统运行并持续观察其调节性能和稳定性等性能情况。

第3阶段:完全退出SVC、SVG,让VMP系统处于自动运行模式,两套VMP系统采用与风电场原集中无功补偿设备相同的控制策略,即控制风电场内集电线路电压为38 kV,运行观察至少1个月的时间。

图6和图7是2014年11月12日至2015年1月13日风电场实时运行数据截图,分别代表1号主变压器和2号主变压器高压侧电压、低压侧电压、高压侧有功功率和高压侧无功功率。

从图6、图7的现场试验数据可看出,主变压器高压侧电压以116 kV为中心在113~118 kV范围内波动,最高短时尖峰电压不超过119 kV,最低短时尖峰电压为111 kV,满足负荷电网的运行要求。

在不同功率阶段(从小负荷到大负荷共经历17次),VMP系统都能够控制风电厂电压稳定。

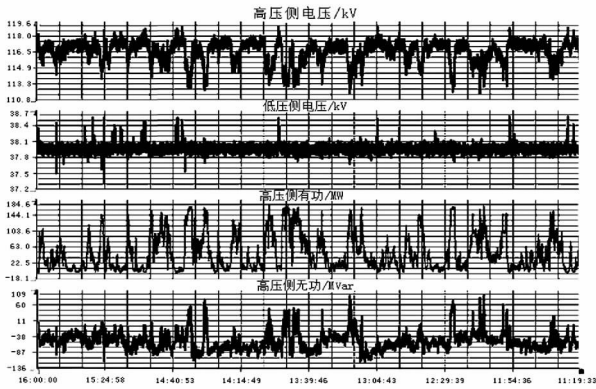


图6 1号主变压器高压侧电压、低压侧电压、高压侧有功、高压侧无功

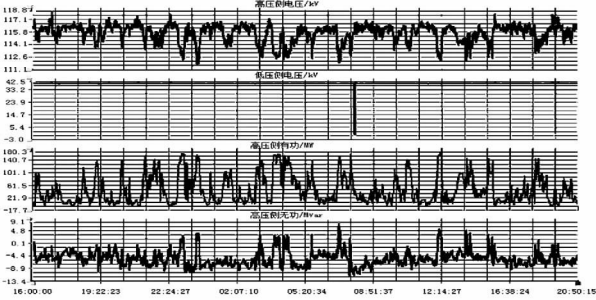


图7 2号主变压器高压侧电压、低压侧电压、高压侧有功、高压侧无功

通过以上分析,得知了VMP系统与SVG对系统的无功电压的补偿起到了很好的稳定作用。在监控时间段内不投无功补偿装置SVG、投入无功补偿装置SVG以及投入VMP系统对电压的控制数据对比分析如图8~图10所示。

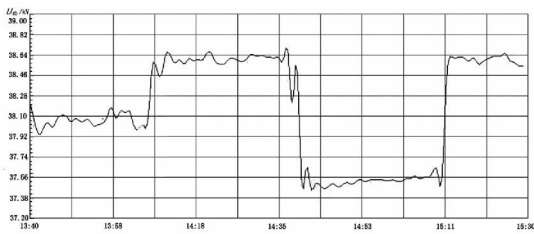


图8 没有SVG补偿时II母电压U_{ab}的电压曲线图

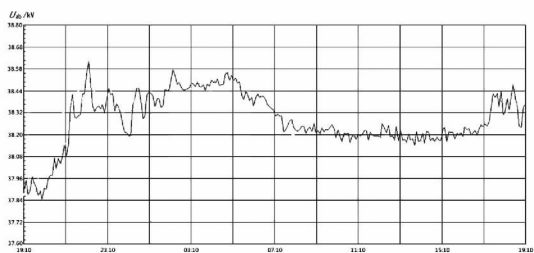


图9 SVG对II母电压U_{ab}的控制效果

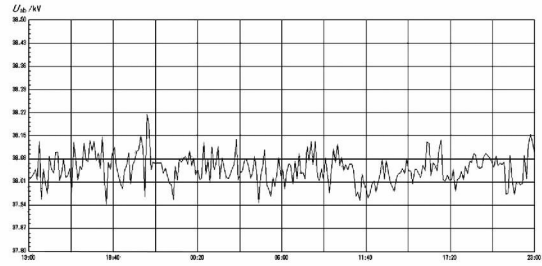


图10 VMP系统对II母电压U_{ab}的控制效果

通过以上分析,在没有SVG无功补偿的方式下,电压最大最小值之差为1.4 kV;在SVG控制方式下,电压最大最小值之差为0.72 kV;在VMP系统下,电压最大最小值之差为0.26 kV。对比可以得出:SVG的投入比没有SVG控制效果好,SVG无功电压控制与VMP系统相比,VMP控制更平稳,误差更小,精度更高。从而可以得出VMP系统无功电压补偿效果更好、更具优势,也保证了输出电压的稳定性。通过此风电场现场试验验证了VMP系统的合理性和有效性。

5 结论

提出了一种新型的控制系统,能够全局地考虑到风电场的无功补偿,并对各风机厂无功补偿任务进行优化分配,通过现场试验验证了该系统的合理性和有效性,并得到以下结论:

1) 风电场有功出力的波动引起并网点电压的波动。随着风电有功出力的增大,并网点电压下降,对电网无功需求不断增大,而VMP系统有效地提供了无功电压的补偿,起到了较好的效果。

2) VMP系统作为新型无功控制设备具有双向性;并能自动连续地调整,具有很高的可控性,便于实施新的控制策略,从而在追加很少的投资情况下,使改善电压质量成为可能。

3) VMP系统对风电场无功电压进行协调控制和管理,提高风电场无功电压运行水平,满足风电场无功运行要求,进而为风电场群、风电场与电网统一协调无功电压控制奠定基础,为以后的研究指引了方向。

参考文献

[1] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):40-45.

(下转第28页)

表 13 算例 2 控制前后综合评价情况

评价等级	很好	较好	一般	较差	很差
控制前	0.418	0.429	0.121	0.032	0
控制后	0.631	0.225	0.111	0.033	0

上述结果表明在策略执行后评价结果中隶属于很好的值最大,较策略执行前有了大幅提高,因此策略执行后综合评价为系统运行很好。

6 总结

地区电网 AVC 策略的运用是地区电网稳定可靠运行的重要保证,通过变压器分接头档位调节与电容器组投切操作实现对电网电压调节与无功补偿。地区电网 AVC 策略评价体系的构建,有效地对电网的运行状态及运行效益做出了较为准确的评价。通过各项指标的逐一量化分析,直观地反映出电网的各项运行指标,为电网的进一步优化运行打好基础。

参考文献

[1] 王昊. 地区电网经济运行与优化算法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

[2] 田洪. 地区电网运行方式评价方法的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

[3] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168 - 174.

[4] 李中玉, 孙胜洪, 王睿. 并网发电机组网源协调原则的探讨[J]. 华东电力, 2013, 41(3): 674 - 676.

[5] 孙惠娟, 彭春华, 易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 123 - 128.

[6] 杨金刚, 吴林林, 刘辉, 等. 大规模风电汇集地区风电机组高电压脱网机理[J]. 中国电力, 2013, 46(5): 28 - 33.

[7] 许晓菲, 牟涛, 贾琳, 等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 15 - 19.

[8] 乔颖, 鲁宗相, 徐飞. 双馈风电场自动电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 96 - 101.

[9] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈风电场新型无功补偿

与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 16 - 23.

[9] 乔颖, 陈惠粉, 鲁宗相, 等. 双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 15 - 22.

作者简介:
李朝阳(1986), 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;
常喜强(1976), 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制及调度自动化;
樊国伟(1976), 工程师, 研究方向为调度自动化;
张锋(1978), 硕士、高级工程师, 研究方向为调度自动化;
王衡(1984), 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制调度自动化;
亢朋朋(1986), 硕士、工程师, 研究方向为电力系统分析与控制。

(收稿日期: 2016 - 07 - 15)

作者简介:

李 昱(1970), 高级工程师, 主要从事电网调度运行及管理。
(收稿日期: 2016 - 10 - 08)

(上接第 9 页)

[2] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168 - 174.

[3] 李中玉, 孙胜洪, 王睿. 并网发电机组网源协调原则的探讨[J]. 华东电力, 2013, 41(3): 674 - 676.

[4] 孙惠娟, 彭春华, 易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 123 - 128.

[5] 杨金刚, 吴林林, 刘辉, 等. 大规模风电汇集地区风电机组高电压脱网机理[J]. 中国电力, 2013, 46(5): 28 - 33.

[6] 许晓菲, 牟涛, 贾琳, 等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 15 - 19.

[7] 乔颖, 鲁宗相, 徐飞. 双馈风电场自动电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 96 - 101.

[8] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈风电场新型无功补偿