

多控制区多无功源协调的风电集群电压控制

陈建华, 杜磊, 陈天华, 黄华, 徐陆飞, 杨洛
(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏南京 211106)

摘要:通过分析风电集群并网接线的特点, 针对风电并网造成电网无功电压问题, 文中提出了多控制区多无功源协调的风电集群电压控制体系。在正常、警戒和紧急多控制区下, 调度主站实现区域支撑下电厂/直控变电站/风电场的连续型和离散型不同无功源的协调控制, 构建快速调制的电压控制体系, 在系统层次进行无功的优化分配; 风电场子站实现基于 SVC/ SVG 无功备用快速响应的无功控制策略, 结合风电场多种无功源不同控制响应特性, 进行快速响应迟滞协调的控制, 降低风电场自有波动性和间歇性对电网的影响。实际系统应用表明, 该控制体系能有效抑制电网电压波动, 降低风电集群脱网的风险。

关键词:电压控制; 风电集群; 区域支撑; 多控制区; 多无功源协调

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)02-0047-05

随着电力需求的日益增长和化石能源的日渐匮乏, 风电作为技术应用最为成熟的清洁能源受到越来越多的重视^[1,2]。大规模风电集群并网给电力系统的无功电压安全调度带来了极大挑战^[3,4]。文献[5]研究了风电场 AVC 子站的控制结构设计, 通过风电场无功控制灵敏度的计算来实现对双馈风电机组的快速和高精度地控制; 文献[6]对适用于变速恒频风电机组在多模式、多目标无功电压协调控制策略进行了研究, 构建风电场子站控制系统结构; 文献[7]阐述了通过静止同步补偿器对风电场无功电压调节控制来弥补风电场无功不足抑制电压波动方法; 文献[8]论述了风电场满足电网电压控制点电压对风电场风机无功协调控制成果。以上文献主要围绕风电场子站无功源设备的运行和接线方式对电压的影响, 针对风电场电压反馈的无功源控制进行论述。文献[9]对风电场集群依据风功率预测和离散无功源的无功支撑来参与二级电压控制, 跟踪中枢母线电压实现无功优化控制; 文献[10]研究将风电场群并网区域以区域网络损耗和汇集母线节点偏差为综合控制目标, 根据无功配置协调多个风电场的无功调节; 文献[11]对大规模风电场集群并网利用风电场自律协同多目标滚动优化协调多无功源实现平抑电压波动的控制技术。以上文献均对风电场集群并网区域多种无功源的协调和跟踪区域中枢电压目标进行了详细研究。

以上研究从风电场子站角度对并网电压进行控制, 而从主站和子站配合角度, 通过汇集母线关口进行协调控制研究较少。基于以上分析, 本文将综合分析风电集群的并网接线方式和特性, 构建多控制区多无功源协调的风电集群电压控制体系, 实现主站与子站之间和其内部的多种无功源地协调。

1 风电集群并网接线特点

大规模的风电集群并网在我国分布较广, 其主要的并网接线方式如图 1 所示。

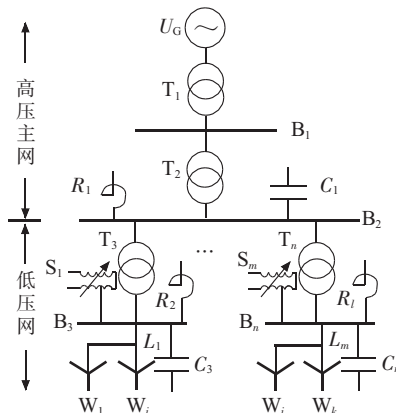


图 1 风电集群并网接线图

多台风机通过馈线(L)馈入低压网低压母线 $B_3 \sim B_n$ 上, 经升压变压器 $T_3 \sim T_n$ 接入汇集母线 B_2 , 并通过 T_2 拓扑至高压主网的无穷大母线 B_1 。

从图 1 中可以看出: (1) 风电并网电网分属省调和地调调度控制中心, 2 者的联络交汇点即为汇集母线 B_2 , 汇集母线电压对保证电网运行安全和风电集群运行均有重要的意义; (2) 高压主网和低压网均有众多类型的无功源, 主网无功源主要由机组(U)、电容器(C)、电抗器(R)和变压器分接头(T)等组成, 低压网无功源主要由电容器、电抗器、变压器分接头、风机(W)和 SVC/ SVG(S)等组成。对无功控制特点而言, 机组、SVC/ SVG、风机等属于连续型控制变量, 而其他设备属于离散型控制变量; AVC 分层控制系统主站和子站控制方式的不同使得各种无功源的无功控制响应特性也有区别, 主站系统由于机组、风电场均不属于直控设

备需协调子站控制因此响应速度较慢,直控变电站的容抗器、分接头等离散设备可以直控,因此响应速度较快,而风电场 SVC/SVG、机组和风机等均可以快速响应,而容抗器和分接头离散设备响应速度稍慢。

由于风电建设在风电资源区域集中建设,而区域内风功率曲线差异较小,风电集群并网体现了高度的区域出力同趋性,放大了风电集群并网电压波动的影响。为了适应风电场波动性和间歇性的特点,应对区域风电集群并网造成电网电压波动甚或风机连锁脱网的危险,保证汇集母线侧的电压安全,需要充分考虑电网多种无功源的离散变量/连续变量和快速响应特性,实现主站侧和风电场侧的协调控制。基于以上分析,本文构建多无功源协调的风电集群并网电压控制体系。

2 分层无功电压控制体系

本文所研究主站和风电场的无功电压控制体系如图 2 所示。

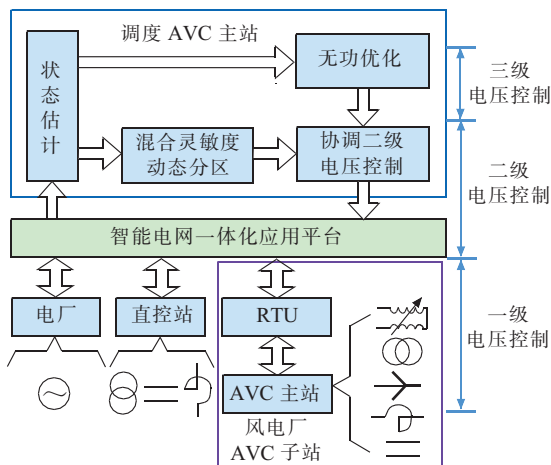


图 2 分层无功电压控制结构

调度 AVC 主站的中心任务是充分利用电厂机组的旋转无功备用和直控变电站变压器分接头和容抗器的调压手段,为整个电网的安全经济运行提供区域无功优化分布,保证风电集群并网的电压要求和正常运行,其实现方式便是基于无功优化的三级电压控制为各个区域提供中枢母线优化目标值,对区域进行扩展二级电压控制^[12],实现基于区域无功电压支撑的电厂/直控变电站/风电场子站多无功源的协调,在正常、警戒和紧急控制状态下生成控制策略并下发遥控/遥调指令。风电场 AVC 子站基于 SVC/SVG 无功备用快速响应特性,协调风电场内多种无功源进行快速响应迟滞协调的无功控制,在紧急情况下进行电压自恢复控制,在正常和紧急情况下接受调度 AVC 主站的下发目标值并实现对目标跟踪控制功能。

调度 AVC 主站和风电场 AVC 子站的信息交互通过智能电网一体化应用平台进行,子站 AVC 将其运行状态、可增/减离散无功量、可增/减连续无功量

上行给主站 AVC。主站 AVC 根据将子站控制信息计入二级电压控制计算其协调控制量,并将目标值下行给予子站 AVC。

3 多控制区多无功源风电集群控制

3.1 汇集母线电压多控制区

对于本文的电压控制体系来讲,汇集母线既是主站和子站之间控制模型联络枢纽^[13],其电压又是风电集群安全并网的重要条件。当风力急剧变化风机集群出力突变时,汇集母线电压也会相应骤变,AVC 控制对于汇集母线的电压支撑会间接提高风电场母线电压稳定性,减少风机由于过压/低压造成脱网事故的发生。为了对汇集母线实现更好的控制,将汇集母线的电压根据不同限值分为正常、警戒和紧急 3 个控制区间,如图 3 所示。

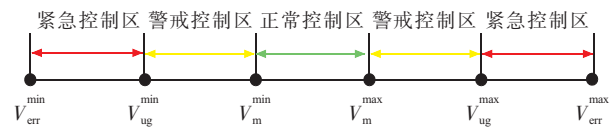


图 3 多控制区示意图

图 3 中, V_m^{\min}/V_m^{\max} , $V_{ug}^{\min}/V_{ug}^{\max}$, $V_{err}^{\min}/V_{err}^{\max}$ 分别为母线电压控制下限/上限、紧急控制下限/上限、错误阈值下限/上限。汇集母线电压偏离正常控制区越远,风机脱网概率也会急剧增加。下面本文将从主站和子站不同的控制区特点出发,构造不同的目标函数和控制策略来实现其对整个电网的无功优化分布控制。

3.2 AVC 主站多控制区无功电压控制

为了实现对汇集母线的电压控制,汇集母线设置为区域内关键母线。主站根据汇集母线的电压情况分别执行正常、警戒和紧急的无功电压控制策略。

正常控制区控制方法即为传统的扩展二级电压控制,其控制目标为中枢母线电压与设定值偏差趋控制死区控制,控制方向为全网无功优化分布,降低全网网损^[12,13],这种控制模式已经成熟应用,本文不再赘述。

警戒和紧急控制区控制方法为越限校正二级电压控制,控制主站实现对汇集母线的无功电压支撑作用,将汇集母线越限电压校正到正常区间,其控制方向为越限电压校正,保证全网电压安全。在该控制区,考虑直控站容抗器对区域的无功支撑作用,预判容抗器动作对区域母线电压和无功分布的影响,协调区域内机组和容抗器等无功源的协调控制。其数学模型为:

$$\begin{cases} \min_{\Delta Q_g, \Delta Q_c, \Delta Q_w} \sum_{i=0}^n \|(V_i - V_i^{\text{lim}} + \delta) + C_{ig} \Delta Q_g + C_{ic} \Delta Q_c + C_{iw} \Delta Q_w\|^2 \\ \text{s.t. } h(u, x) = 0 \\ g(u, x) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: V_i, V_i^{lim} 为区域内第*i*条电压越限母线(母线可为中枢/控制/关键母线)的当前电压和所越限值; δ 为母线电压控制死区,当母线越上限时,该值大于0,当母线越下限时,该值小于0; $\Delta Q_g, \Delta Q_c, \Delta Q_w$ 分别为电压校正控制中机组、容抗器和风电场的无功调整量; C_{ig}, C_{ic}, C_{iw} 为机组、容抗器和风电场无功对第*i*条母线电压灵敏度; h 和 g 分别为二级电压控制中的等式约束和不等式约束; u 和 x 分别为二级电压控制中的状态变量和控制变量。

AVC主站多控制区无功电压控制流程如图4所示。主站根据汇集母线的控制区间,在正常区主要通过机组、风场和容抗器协调来提高电网经济效益;在警戒和紧急控制区,主站会直接对容抗器进行预控进行区域无功电压支撑,提升汇集母线的电压稳定性。

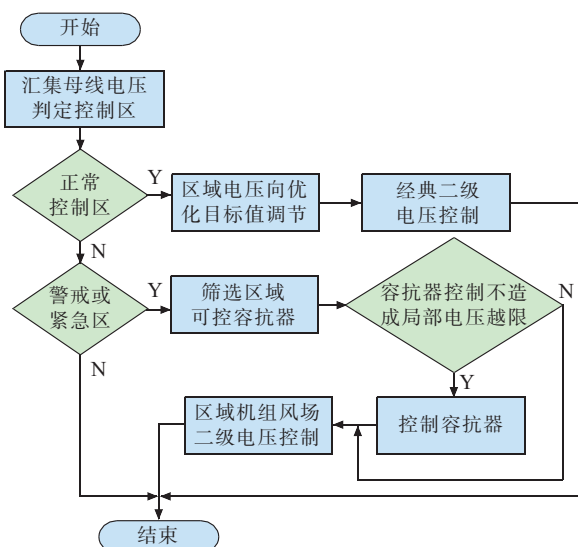


图4 AVC主站多控制区电压控制方法流程

3.3 AVC子站多控制区无功电压控制

SVC和SVG虽然工作机理和调节属性不同,然而均可实现对无功的快速连续调节,从而完成对电压目标的快速跟踪响应。为适应风电场的波动性的特点,我国大多数并网风电场含有SVC或SVG无功源,本文将充分利用其无功控制特性,构建在接受目标值时SVC/SVG快速响应,与其他无功源迟滞协调以SVC/SVG无功出力趋零为目标的AVC子站无功电压控制系统。该AVC子站系统在接受目标值初始的控制目标为:

$$Q_s^{\text{fst}} = \begin{cases} \min(Q_s^{\text{ref}}, Q_s^{\text{max}}), & Q_s^{\text{ref}} > 0 \\ \max(Q_s^{\text{ref}}, Q_s^{\text{min}}), & Q_s^{\text{ref}} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

在SVC/SVG初始控制结束后的后续协调控制目标函数为:

$$Q_s^{\text{end}} = \min(Q_s - Q_s^{\text{coop}}) \quad (3)$$

式(2,3)中: Q_s^{fst} 和 Q_s^{end} 分别为SVC/SVG在子站初始接

受AVC目标值和后续协调中的无功出力目标值; Q_s^{ref} 为AVC子站接受的无功目标值(如果为电压目标值,则根据当前母线电压和目标电压进行无功目标计算), Q_s^{max} 和 Q_s^{min} 为SVC/SVG的最大/最小无功出力(容性出力为正值,感性出力为负值); Q_s 为SVC/SVG初始控制结束后当前无功出力; Q_s^{coop} 为后续协调中其他无功源协调无功控制量和的差值。AVC子站控制须满足母线电压、SVC/SVG/容抗器/风机等无功、主变档位等约束。

AVC子站多控制区的电压控制方法流程如图5所示。

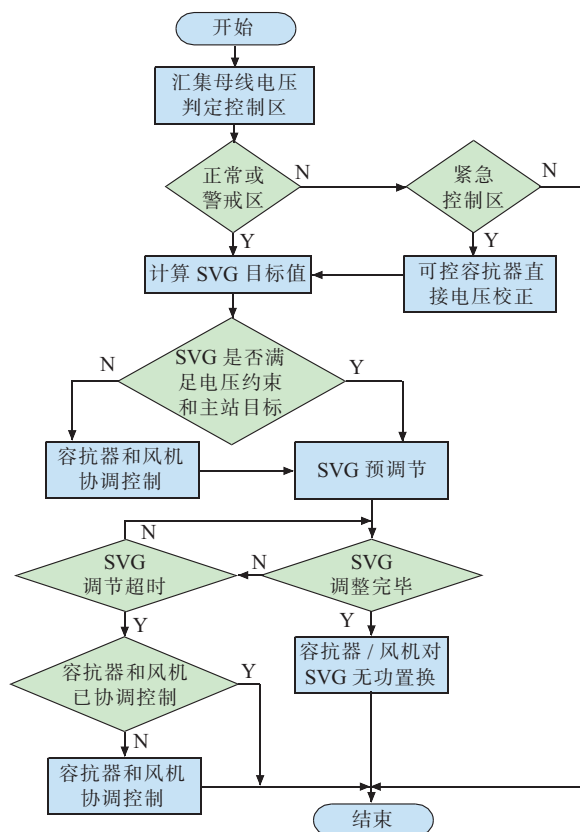


图5 AVC子站多控制区电压控制方法流程

汇集母线电压在正常/警戒控制区,子站AVC优先使用SVC/SVG优先快速响应,响应结束后和其他无功源进行迟滞协调的控制,该控制模式可以实现对母线电压目标的快速跟踪和电压快速校正能力,能够充分发挥不同无功源的协调控制,抑制风电场的电压波动性对电网电压的影响。

在紧急控制区,AVC子站对容抗器直接控制,并同时SVG生成控制目标,实现对汇集母线电压的快速校正控制,当汇集母线电压越紧急下限时需要增加容性出力,切除电抗器或投入电容器,SVC/SVG在有容性无功出力能力下快速增加容性无功出力;反之,在汇集母线电压越紧急上限时需要增加抗性出力,切除电容器或投入电抗器,SVC/SVG在有抗性无功出力

能力下快速增加抗性出力无功。

无论在正常、警戒还是紧急控制区,在 SVG 控制结束后均会进行多无功源的迟滞协调,将 SVG 中的无功出力使用容抗器和风机无功出力进行最大程度的置换,保证 SVG 的无功备用,确保子站的无功快速调节响应能力,提升汇集母线电压稳定性。

4 现场应用

本文所提出的多控制区多无功源协调的风电集群并网分层电压控制在西北某省调获得了实际应用。以该省调某区域为例进行分析,该区域有 2 个火电厂和 3 个风电场,风电场并网接入同一汇集母线,汇集母线定义母线电压紧急上/下限分别为 238/222 kV,正常控制上/下限分别为 236/224 kV。该技术控制策略和控制效果可以通过 2014 年 11 月 3 日 09:30 后汇集母线控制曲线进行分析,如图 6 所示。

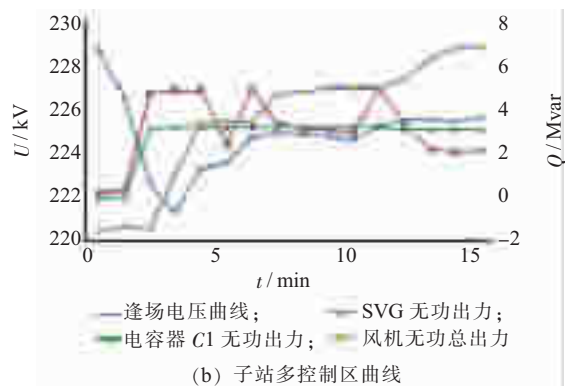
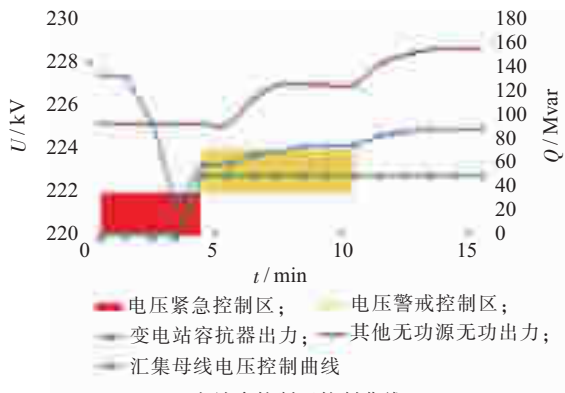


图 6 多控制区控制曲线

09:33 左右,汇集母线发生电压突变,电压降低至汇集母线电压紧急控制区,主站 AVC 执行紧急区电压控制策略,投入区域内相邻直控变电站的电容器(上绿色曲线)进行无功支援;子站 AVC 投入站内电容器 C1(下绿色曲线)并将 SVG 投入无功出力(下红色曲线),风机无功出力增加(下紫色曲线)。随着无功分布变化,09:35 左右汇集母线电压脱离紧急控制区而进入警戒控制区,主站 AVC 执行警戒区电压控制策略,给电厂/风电场下发提高母线电压增无功出力命令,电

厂/风电场响应指令,无功出力(上红色曲线)持续增加;风电场 SVG 迅速响应,满发无功,风机无功出力持续增加,同时 SVG 无功出力相应减发无功,以 SVG 无功备用最大为控制目标。汇集母线电压在 09:40 分左右进入正常控制区,执行常规二级电压控制策略进行调节。

从图 6 中可以看出 AVC 主站和子站在不同的控制区进行协调分层无功电压控制,充分发挥了多无功源自身的无功电压特性,平抑电压波动,提高了电网电压的稳定性。

为了分析实际闭环系统的控制性能,选取风功率曲线相似日来进行对比分析。如图 7 所示。蓝色曲线为 2014 年 4 月 7 日闭环投入前母线电压采样曲线,红色曲线为 2014 年 9 月 28 日闭环投入后母线电压采样曲线,从控制曲线中可以看出闭环投入后汇集母线的电压波动有所降低,尤其是在 03:00~06:00 和 14:00~17:00 时间段对电压波动的抑制作用较为明显。

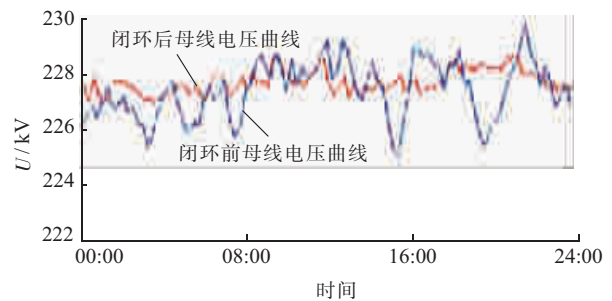


图 7 风场闭环投运前后汇集母线电压曲线对比

为了验证该技术对风电场并网电压波动的抑制作用,通过对比同期 AVC 闭环前后汇集母线电压波动率进行分析,如表 1 所示。

表 1 风场闭环前后汇集母线电压波动率对比 %

统计内容	9月	10月	11月	12月
2013年母线日均波动率	1.27	1.31	1.32	1.39
2014年母线日均波动率	1.14	1.11	1.17	1.08

从表 1 中可以看出 2014 年闭环后汇集母线电压波动有所降低,从而体现了该技术可以降低风电集群并网对电网电压波动影响。

5 结束语

大规模风电集群并网汇集母线是主站侧和子站侧的协调枢纽,其电压状况即是风电并网的重要的判定标准,又是风机脱网重要的影响因子。本文通过将汇集母线电压状态分为正常、警戒和紧急区,主站和子站侧在多个控制区的进行区域内统一多无功源协调,抑制风电波动对电网的影响,提高电网的消纳能力,基于此技术开发的自动电压控制系统已在某省调获得应用,取得了预期的效果。

参考文献:

- [1] METHAPRAYOON K, YINGVIVATANAPONG C, LEE W J, et al. An Integration of ANN Wind Power Estimation Into Unit Commitment Considering the Forecasting Uncertainty[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(6): 1441-1448.
- [2] 白建华, 辛頌旭, 贾德香, 等. 中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 14-17.
- [3] ERLICH I, RENSCH K, SHEWAREGA F. Impact of Large Wind Power Generation on Frequency Stability[C]. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006: 1-8.
- [4] 范高锋, 裴哲义. 2011年中国“三北”地区风电并网运行及反事故措施[J]. 中国电力, 2012, 45(12): 86-90.
- [5] 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.
- [6] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36.
- [7] 王成福, 梁军, 张利, 等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 23-28.
- [8] 王岩松, 朱凌志, 陈宁, 等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 83-88.
- [9] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 计及风电功率波动影响的风电场集群无功电压协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4761-4769.
- [10] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场群的无功电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 34(18): 78-83.
- [11] 郭庆来, 王彬, 孙宏斌, 等. 支撑大规模风电集中接入的自律协同电压控制技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 88-93.
- [12] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 协调二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19-24.
- [13] 廖成滨, 温步瀛, 江岳文. 风电并网后系统电压稳定薄弱节点研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(10): 82-86.

作者简介:

- 陈建华(1977),男,山东德州人,工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 杜磊(1982),男,山东高唐人,工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 陈天华(1981),男,江苏南通人,高级工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 黄华(1978),男,湖北公安人,高级工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 徐路飞(1985),男,辽宁沈阳人,工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 杨洛(1987),男,四川广元人,工程师,从事无功电压优化控制工作。

Voltage Control for Multi-controlled Domain and Multi-reactive Power Source Coordinated Wind Power Cluster

CHEN Jianhua, DU Lei, CHEN Tianhua, HUANG Hua, XU Lufei, YANG Luo
(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper analyzes the characteristics of grid connection for wind power integration. For the reactive power voltage problem caused by wind power, a framework of voltage control for multi-controlled domain and multi-reactive power source coordinated wind power cluster is proposed. Under the normal and emergency states, the master station implements continuous and discrete reactive sources control for power plants, directed control substation, and wind power plant to optimize the allocation of reactive power in the system level. Wind power plant station implements SVC/SVG based fast response reactive power control strategy. Combined with the response characteristic of various reactive power sources, fast response delaying coordination control is implemented to reduce the effects of volatility and intermittent of wind power. Application in an actual system show that the control system can effectively restrain the voltage fluctuation and reduce the risk of wind power cluster disconnecting to the main grid.

Key words: voltage control; wind power cluster; regional support; multiple control domains; multi reactive power sources coordination

(上接第 46 页)

Application of Wide Area Synchronized Measurement in Protection and Control of Smart Grid

WANG Liang¹, QIU Yutao², LILI¹, FANG Yudong², LI Yuanyuan¹, HU Tiejun²
(1. Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;
2. Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310072, China)

Abstract: The synchronized phasor measurement based the Wide Area Measurement System is expanding and improving constantly, which provides important data to support power system observing. With the development of the Smart Grid, many new ideas about the synchronized phasor measurement and application are proposed for reality applications. But those ideas are not systematized due to there isn't a unified principle to follow. This paper proposes a principle of time-space coordination based on the physical conditions and protocol support from the aspect of observability and controllability, and then introduces the application of wide area synchronized measurement in the protection and control of Smart Grid.

Key words: wide area measurement; smart grid; synchronized phasor