

一种新能源电站有功功率柔性控制方法及应用

宋 兵,余群兵,陈 俊,徐光福,朱中华
(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

摘要:当前新能源电站有功功率控制主要采用通信指令调节大量逆变器和风机等设备的方式,其有功功率控制速度慢,无法满足系统级有功功率紧急控制对新能源场站级有功功率控制提出的要求。为此,结合当前新能源电站有功功率控制模式,利用保护装置毫秒级开断速度的优势,提出一种有功功率柔性控制方法,并设计该控制方法的系统架构及有功功率控制流程,以满足正常运行时自动发电控制和紧急情况时快速控制的双重需求。提出多目标约束有功功率优化控制的数学模型,并阐述通过改进的优先顺序法求解该数学模型的具体步骤。通过现场实际应用的案例分析,验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词:新能源电站;有功功率柔性控制;紧急控制;多目标约束;优先顺序法

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.031

0 引言

近年来,我国新能源资源的开发利用发展迅速,预计到 2020 年,全国新能源发电装机容量可达 4.1×10^8 kW。由于新能源电站的发电量受天气影响明显,具有随机性、间歇性和波动性的特点,给电网的安全稳定运行带来了巨大的冲击和挑战^[1-5]。太阳能和风能资源集中的地区,一般相对远离负荷中心,电力资源以输出为主,但电力输送通道容量有限^[6],并且新能源电站有功功率控制主要依赖场站端自动发电控制(AGC)系统,通过通信指令的方式,对大量的逆变器和风机等设备进行功率调节,因此其有功功率控制响应速度慢、参与有功功率紧急控制的能力弱。为了保证电网安全,在实际运行中电网调度只能给电力输送容量留有更大的安全裕度,这会导致电网可消纳新能源发电量的能力不能被充分利用^[7],造成新能源资源的极大浪费。因此,如何对新能源电站输出的有功功率进行快速、精确的控制,提高其参与功率紧急控制的能力,在给输送通道预留合理的安全裕度,保证电网运行安全的前提下,最大化利用清洁能源,提高电站的发电量,是电网管理部门和新能源电站业主都十分关心的问题。

目前国内外学者对新能源电站有功功率控制的研究较多地集中在场站端 AGC 系统^[8-9],将新能源电站整体纳入现有电网调度控制系统,而针对参与安全稳定控制系统有功功率紧急控制的研究较少。对于安全稳定和有功功率紧急控制的研究^[7,10-14],主要关注系统层级的有功功率分配和紧急控制,对新能源场站层级的有功功率紧急控制方法和策略则较少关注。因此,如何满足系统级功率紧急控制和协调控制对新能源场站端有功功率控制提出的要求,在具备常规 AGC 系统功能的同时,实现紧急控制条件下的新能源场站级有功功率优化和协调控制

的问题,值得进一步研究。

本文根据系统级功率紧急控制和协调控制对新能源场站端功率控制提出的要求,针对现有新能源电站功率控制存在的调节速度缓慢、参与紧急控制能力弱等缺点,并结合目前场站 AGC 系统的实际情况,提出了一种新能源电站有功功率柔性控制方法,利用保护装置毫秒级开断速度的能力,参与场站端有功功率紧急控制,以满足正常运行时 AGC 和紧急情况时快速控制的双重需求。该方法在保证电网正常调度运行和紧急控制安全的前提下,通过多目标约束有功功率优化控制策略,实现了最大限度利用新能源发电。通过在众多新能源电站的现场实际运行,验证了本文设计的有功功率柔性控制方法的可行性和有效性。

1 系统结构

目前新能源电站有功功率控制主要是通过调度端 AGC 主站和场站端 AGC 子站的分层分级协调控制来实现^[8]。有功功率柔性控制系统遵循现有分层分级协调控制的原则,部署在风电场或光伏电站等新能源场站端,与调度端有功功率控制系统协调配合。其具备电网正常调度运行时的 AGC 功能,以及紧急控制情况下的有功功率快速控制功能。主要用于监视新能源电站运行数据和向调度主站上送信息,并接收调度主站下发的有功功率目标控制指令,在保证风电场或光伏电站总有功出力满足调度要求的前提下,通过选择合理的有功功率控制策略,实现新能源电站优化经济运行。

有功功率柔性控制系统主要由有功功率柔性控制装置、有功功率柔性控制工作站组成,可采集各风机或者光伏逆变器的运行状态,以及各集电馈线的有功数据等信息,同时可接收调度主站的有功功率目标控制指令。其系统结构如图 1 所示。

有功功率柔性控制装置是系统的核心,其包括

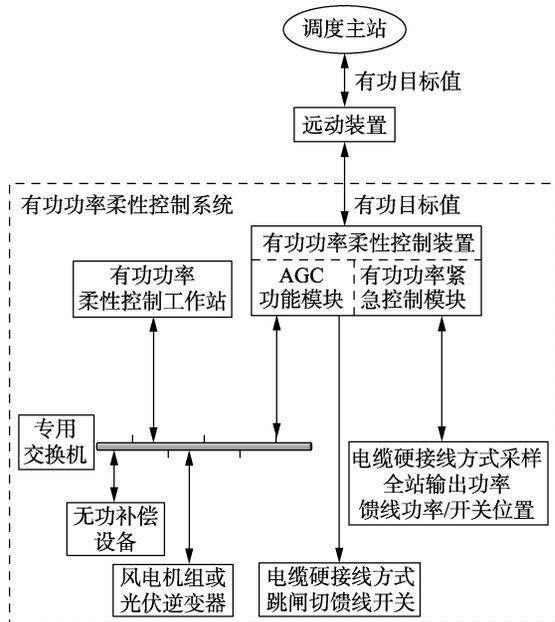


图 1 有功功率柔性控制系统结构图

Fig.1 Structure diagram of active power flexible control system

AGC 功能模块和有功功率紧急控制模块。AGC 功能模块可满足电网正常调度运行条件下场站端有功功率的调节要求,实现其输出有功功率的精细化控制和调节;有功功率紧急控制模块可满足电网紧急控制条件下,快速降低场站有功出力的要求,在电站有功功率未及时降至目标值以下时,通过馈线切除控制策略,最优化地选择部分馈线进行切除,快速可靠地控制电站有功功率。

有功功率柔性控制工作站主要是实现系统的运行监视和数据管理及计算功能,包括调度指令显示、告警信号提示、定值修改、曲线展示、统计信息展示、历史事件记录等。

2 有功功率柔性控制方法设计

2.1 有功功率控制流程设计

本文有功功率柔性控制系统在遵循现有功率分层分级协调控制的体系下进行设计,通过电网正常调度运行时的 AGC 功能,以及紧急控制情况下的有功功率快速控制功能,实现新能源电站有功功率可靠调节和控制。有功功率柔性控制系统一般通过远动装置与调度主站进行通信,也可以通过在有功功率柔性控制装置上扩展通信插件,以实现与调度主站的信息交互和有功功率的闭环控制。

调度主站综合场站端上送信息、常规发电机组运行计划、超短期功率预测、超短期负荷预测等多源数据,同时根据当前运行方式、联络线计划、安全约束等条件,协调优化常规机组和新能源电站的有功控制目标值^[15],并将目标值下发至场站端有功功率柔性控制系统。有功功率柔性控制系统作为场站端有功功率控制主体,接收到调度主站下发的有功目

标值后,由 AGC 功能模块对全站有功功率进行精细化控制和调节,如果在有功功率紧急控制情况下,风电场或光伏电站有功出力在规定时间内未调节到位,即仍大于调度主站下发的目标值,有功功率柔性控制系统就会通过多目标约束控制策略选择快速可靠切除部分集电馈线,以保证新能源电站总有功出力值及有功调节速率满足调度要求。

此外,本文有功功率柔性控制系统具有无扰切换及容错功能。当与调度主站通信中断后,系统会无扰动自动切换至本地控制模式,以有功功率柔性控制装置中预先设定的有功目标值为目标进行有功控制,直至通信状态恢复正常;当系统接收的有功目标值发生明显异常时,将舍弃该有功目标值,依然以前一次正常有功目标值进行有功控制,避免场站端输出有功功率大幅波动对电网造成不良影响。

本文提出的有功功率控制流程如图 2 所示。

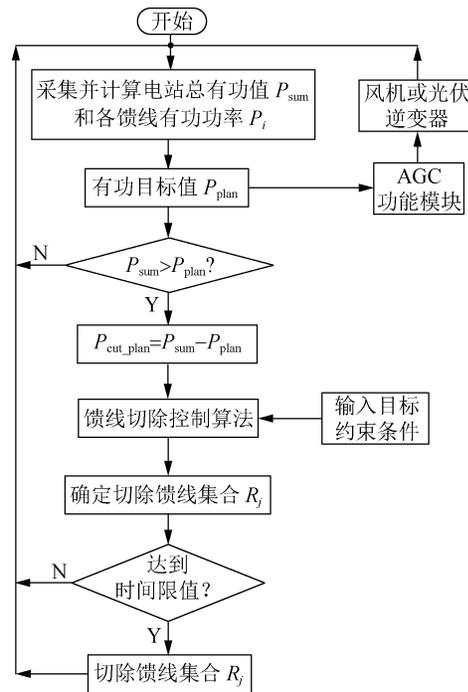


图 2 有功功率控制流程图

Fig.2 Flowchart of active power control

2.2 多目标约束馈线切除控制策略设计

有功功率控制策略是有功功率柔性控制系统的核心,直接影响新能源电站有功出力的大小。如何在满足调度端对有功出力值及有功调节速率要求的前提下,实现新能源电站出力最大化、最优化,提高新能源综合利用率,是有功功率控制策略设计的出发点和落脚点。本文所提有功功率控制策略主要是针对紧急控制情况下的馈线切除,电网正常运行调度时的 AGC 功率控制策略已有众多文献^[8-9]进行过阐述,此处不再赘述。

本文提出的多目标约束馈线切除控制策略,是计及了有功目标值、场站有功功率输出值、分期上网

电价、馈线是否可切等约束条件,以系统安全和切馈线控制经济代价最小为目标的最优控制问题。最优馈线切除控制策略的数学模型可转换为:

$$\min P_{\text{cut}} = \sum_{i=1}^n K_i C_i P_i \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n C_i P_i \geq P_{\text{sum}} - P_{\text{plan}} \quad (2)$$

$$C_i \in \{0, 1\}$$

其中, K_i 为第 i 条备选切馈线对象的调节系数,实际应用中主要依据上网电价、逆变器调节性能、馈线切除后恢复成本等相关变量来计算; C_i 为第 i 条备选切馈线对象是否进行切除的 0-1 变量, $C_i = 1$ 时表示切除第 i 条馈线, $C_i = 0$ 时表示保留第 i 条馈线; P_i 为柔性功率控制系统实时采集的第 i 条备选切馈线对象的有功功率值; P_{sum} 为该场站输出的总有功功率值; P_{plan} 为该场站接收调度主站实时下发的有功功率目标值; n 为馈线数。

从上述数学模型中可以看出,在满足新能源电站调度有功目标值等约束条件的前提下, P_{cut} 值越小,相应的切馈线组合就越优。

在电力系统机组组合问题中,由于优先顺序法简单、易于实现、运算时间短,且不会存在不收敛或者得不到可行解的情况,能较快地获得满足目标近似最优解,较多地应用于实际系统中^[16]。因此本文采用改进的优先顺序法来求取馈线切除控制策略数学模型的最优组合。

馈线切除控制策略最佳组合求取过程的主要步骤如下。

a. 输入有功目标值、场站有功功率输出值、各馈线有功功率值、各馈线上网电价等相关数据。

b. 计算备选切馈线对象的调节系数 K_i 。

c. 将所有备选切馈线对象按照调节有功功率值 ($K_i P_i$) 从小到大排序,建立新能源电站场站内备选切馈线对象的控制序列,为了方便说明,假定编号为 i 的馈线在控制序列中的排序也为 i 。

d. 从上述序列中选取最大可能切除的馈线集合 R ,满足 $\sum_{i=1}^{J-1} P_i < P_{\text{sum}} - P_{\text{plan}} \leq \sum_{i=1}^J P_i$,其中 J 为最大可能切除的馈线数目。

e. 在选出的切馈线集合中逐个剔除调节有功功率值较大的馈线,若满足 $\sum_{i=1}^{J-k} P_i + P_J \geq P_{\text{sum}} - P_{\text{plan}}$,则 $k = k + 1$ ($k = 2, 3, \dots, J - 1$),继续执行步骤 e; 否则得到本步骤优化后的集合,并转入步骤 f。

f. 在采用步骤 e 优化后的集合中再逐个剔除调节有功功率值较小的馈线,若满足 $\sum_{i=m}^{J-k+1} P_i + P_J > P_{\text{sum}} - P_{\text{plan}}$,则 $m = m + 1$ ($m = 2, 3, \dots, J - k + 1$),继续执行本

步骤;否则结束优化,得到最优的切馈线集合。

基于改进的优先顺序法求取馈线切除控制最优组合的具体流程如图 3 所示。

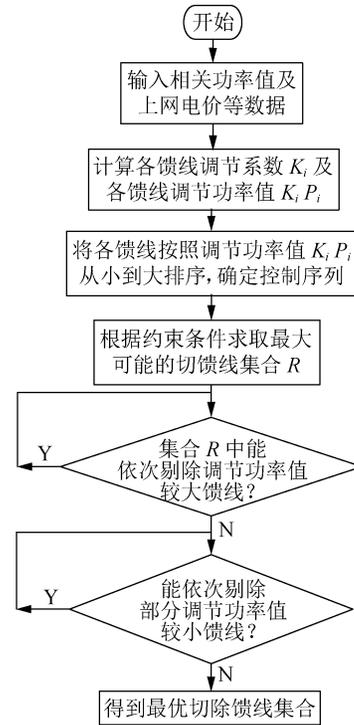


图 3 采用馈线切除控制策略求取最优组合的流程

Fig.3 Flowchart of solving optimal combination with feeder tripping control strategy

3 实际应用

根据本文所提方法研制的新能源电站有功功率柔性控制系统 PCS-9729,已在我国西北地区众多新能源电站投入运行,其运行效果良好,进一步验证了该系统的可行性和有效性。以青海某光伏电站为例,该电站总装机容量为 90 MW,分四期建设,共有集电馈线 15 条,一至四期的上网电价分别为 1.15、1.095、0.9 元/(kW·h)。根据上网电价、逆变器调节性能、馈线切除后恢复成本等变量,计算所有馈线对象的调节系数,并且结合某一时刻各馈线功率值,计算其调节有功功率值,通过排序确定顺序优先级。

由于该电站各期使用的逆变器型号相同,馈线切除后的恢复成本一致,所以取各馈线调节系数为上网电价。该电站 15 条集电馈线的运行信息和控制序列信息如表 1 所示。当前控制周期下,调度下发的有功功率目标值为 65 MW,该电站输出的总有功功率值为 64.99 MW,在下一控制周期,由于系统稳定需要,调度端要求该场站有功功率在 120 s 内调节至 45 MW。当该站柔性功率控制系统接收到有功功率目标值为 45 MW 后,首先立即由 AGC 功能模块对光伏逆变器进行调节,经 120 s 延时后,AGC 将该站有功出力调节至 59.98 MW,各馈线功率如表 1

所示。由于场站有功出力未达到调度目标值,因此紧急功率控制模块将采用功率控制策略选择部分馈线切除,且至少切除 14.98 MW 的有功功率。

表 1 各馈线运行信息与控制序列信息

Table 1 Operation and control sequence information of all feeders

馈线	有功功率/MW	调节系数	调节有功功率/MW	顺序优先级
12	1.50	0.95	1.425	1
11	3.08	0.95	2.926	2
9	3.10	0.95	2.945	3
8	2.98	1	2.980	4
10	3.15	0.95	2.993	5
1	2.75	1.15	3.163	6
6	3.25	1	3.250	7
7	3.50	1	3.500	8
5	3.60	1	3.600	9
4	3.32	1.15	3.818	10
3	3.55	1.15	4.083	11
2	3.81	1.15	4.382	12
14	7.38	0.9	6.642	13
15	7.50	0.9	6.750	14
13	7.51	0.9	6.759	15

本站在上述切除馈线最佳组合求取过程中,各输入值 $P_{\text{sum}} = 59.98 \text{ MW}$, $P_{\text{plan}} = 45 \text{ MW}$ 。执行完步骤 a—c 后得到的控制序列如表 1 中顺序优先级所示;执行完步骤 d 后得到的最大切馈线集合为 $\{R_1^{12}, R_2^{11}, R_3^9, R_4^8, R_5^{10}, R_6^1\}$ (R_i^j 为编号 j 的馈线,在按照调节有功功率值排序的控制序列中的优先级顺序为 i)。执行完步骤 e 和步骤 f,将 R_1^{12} 从切馈线集合中剔除,得到最优的切馈线集合为 $\{R_2^{11}, R_3^9, R_4^8, R_5^{10}, R_6^1\}$,即通过跳开对应馈线开关的方式将馈线 11、馈线 9、馈线 8、馈线 10 及馈线 1 切除,切除的总有功功率值为 15.06 MW,场站总有功功率值快速降至 44.92 MW,满足了调度端功率控制目标。

根据青海电力调控中心发布的报告,在全面建成柔性功率控制系统后,由于场站端功率调节速度、控制精度和可靠性明显增加,每日可接纳新能源电量增加 8%,海西电网新能源送出断面利用率也由原来的 90% 提高到 98% 以上^[17]。新能源电站有功功率柔性控制系统有效地提高了新能源综合利用率。

4 结论

本文根据系统级有功功率紧急控制对新能源场站端功率控制提出的要求,提出了一种新能源电站有功功率柔性控制方法,满足了正常运行时 AGC 和紧急情况时快速控制的双重需求。采用该方法的系统,在保证电网安全稳定运行的前提下,能对场站端输出功率进行快速、可靠的调节,实现新能源电站与电网系统的友好互动,充分利用电力通道输送能力。同时采用改进的优先顺序法求解多目标约束功率优

化控制数学模型,使新能源电站优化经济运行。有功功率柔性控制系统在众多新能源电站具有良好的应用情况,验证了其相关设计和算法的合理性和有效性,为大规模新能源电站有功功率控制提供了一种更加有效、可靠的解决方案,同时对源网荷友好互动系统中负荷的柔性控制有一定借鉴意义。如何通过优化有功控制策略进一步提高控制对象的柔性和友好性需要更加深入的研究。

参考文献:

- [1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.
- [3] 李茜,刘天琪,何川,等. 含风电系统的有功和备用协调优化方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):7-14.
LI Qian, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Coordinated optimization of active power and reserve capacity for power grid with wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 7-14.
- [4] 范高峰,赵海翔,戴慧珠,等. 大规模风电对电力系统的影响和应对策略[J]. 电网与清洁能源,2008,24(1):44-48.
FAN Gaofeng, ZHAO Haixiang, DAI Huizhu, et al. The impact and countermeasure of large scale wind power on power system [J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(1): 44-48.
- [5] YUAN Xiaoming. Overview of problems in large-scale wind integrations [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 22-25.
- [6] 国家电网公司. 国家电网公司促进新能源发展白皮书(2016) [R]. 北京:国家电网公司,2016.
- [7] 李雪明,行舟,陈振寰,等. 大型集群风电有功智能控制系统设计[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):59-63.
LI Xueming, XING Zhou, CHEN Zhenhuan, et al. Design of large clusters of wind power active intelligent control system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 59-63.
- [8] 乔颖,鲁宗相. 考虑电网约束的风电场自动有功控制[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):88-93.
QIAO Ying, LU Zongxiang. Wind farms active power control considering constraints of power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 88-93.
- [9] 李静坤,姚秀萍,旷瑞明,等. 新疆风电场有功功率控制策略与实现[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):44-46.
LI Jingkun, YAO Xiuping, KUANG Ruiming, et al. Wind farms active power control strategy and implementation in Xinjiang [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 44-46.
- [10] 高宗和,滕贤亮,张小白. 适应大规模风电接入的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):37-41.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai. Solution of active power dispatch and control scheme for interconnected power grids with large-scale wind power integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 37-41.
- [11] 谢仕炜,胡志坚,宁月. 考虑最优负荷削减方向的电网多目标分层随机机会约束规划[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):

- 35-42.
- XIE Shiwei, HU Zhijian, NING Yue. Multi-objective hierarchical stochastic chance-constrained programming considering optimal load-shedding direction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):35-42.
- [12] 行舟,陈永华,陈振寰,等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(一)风电场之间的协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20):20-23.
- XING Zhou, CHEN Yonghua, CHEN Zhenhuan, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part one coordination control for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20):20-23.
- [13] 陈振寰,陈永华,行舟,等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(二)风火电“打捆”外送协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21):12-15.
- CHEN Zhenhuan, CHEN Yonghua, XING Zhou, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part two coordination control for shared transmission of wind power and thermal power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21):12-15.
- [14] 徐海波,赵杰,刘平,等. SCS-500W 风电场有功功率控制装置研制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23):102-105.
- XU Haiibo, ZHAO Jie, LIU Ping, et al. Development of SCS-500W wind farms active power control device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23):102-105.
- [15] 冯利民,范国英,郑太一,等. 吉林电网风电调度自动化系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11):39-43.
- FENG Limin, FAN Guoying, ZHENG Taiyi, et al. Design of wind power dispatch automation system in Jilin power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11):39-43.
- [16] 黎静华,兰飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2):1-7.
- LI Jinghua, LAN Fei. Extended priority list method for unit commitment problem[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2):1-7.
- [17] 青海电力调控中心. 青海电网 2015 年二季度新能源电站运行情况通报[R]. 青海:青海电力调控中心, 2015.

作者简介:



宋兵

宋兵(1986—),男,湖北黄梅人,工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护和新能源发电及控制(E-mail:songbin@nrec.com);

余群兵(1979—),男,湖北黄梅人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护;

陈俊(1978—),男,江苏泰州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为发电厂控制及继电保护;

徐光福(1982—),男,安徽滁州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护和新能源发电及控制;

朱中华(1979—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要研究方向为配电自动化和配电保护与控制。

Flexible control method of active power for renewable energy station and its application

SONG Bing, YU Qunbing, CHEN Jun, XU Guangfu, ZHU Zhonghua

(Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Currently the active power control of renewable energy station mainly employs the communication command to adjust a large number of inverters and wind generators. However, the active power control speed is slow, which cannot satisfy the requirement of active power emergency control at the system level. A flexible active power control method based on current active power control mode of renewable energy station is proposed, in which the advantage of millisecond breaking rate for the protection device is fully exploited. The system architecture of the proposed method and active power control process is designed. A mathematical model with multi-objective constrained active power optimization control is proposed, which is solved by an improved priority list method. The feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by practical engineering application case study.

Key words: renewable energy station; active power flexible control; emergency control; multi-objective constraint; priority list method