

高比例分布式光伏接入下的配电网电压控制策略研究

康田园*, 詹惠瑜, 贾东梨, 叶学顺, 李 昭

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 海淀 100192)

摘要: 高比例分布式光伏并网对中低压配电网产生了显著的影响, 尤其是光伏渗透率较高时容易出现电压越限、波动等问题, 严重影响配电网安全稳定运行。分析了传统配电网电压控制策略, 在此基础上提出了基于光伏逆变器的功率因数、功率和电压的综合电压控制方法, 并通过实际配电网算例进行仿真验证, 仿真结果表明该方法具有良好的电压控制效果, 可有效提升高比例分布式光伏配电网运行的安全性。

关键词: 高比例分布式光伏; 配电网; 逆变器; 电压控制

中图分类号: TM73

Research on Voltage Control Strategy of Distribution Network under High Proportion of Distributed Photovoltaic Access

KANG Tianyuan*, ZHAN Huiyu, JIA Dongli, YE Xueshun, LI Zhao

(China Electric Power Research Institute, Beijing Haidian 100192, China)

Abstract: The high proportion of distributed photovoltaic grid connection has a significant impact on the medium and low voltage distribution network, especially when the photovoltaic penetration rate is high, it is easy to have problems such as voltage violation and fluctuation, which seriously affects the safe and stable operation of the distribution network. This paper analyzes the voltage control strategy of the traditional distribution network, and on this basis, a comprehensive voltage control method based on power factor, power and voltage based on photovoltaic inverter is proposed. The simulation results show that the method has a good voltage control effect, and can improve the safety of distribution network with high proportion of distributed photovoltaic.

Keywords: high proportion of distributed photovoltaics; distribution network; inverters; voltage control

0 引言

随着新型配电系统的建设与发展, 分布式电源与储能的大规模应用成为必然趋势。2021年10月国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》中提出: “到2030年, 风电、太阳能发电总装机总容量达到12亿kW以上”。“十四五”期间, 我国分布式能源装机总量达270 GW, 其中分布式光伏装机达143 GW, 分布式风电装机达120 GW, 政策加持与落实推动正在加速大规模分布式电源的发展, 政策的加持与落实推动大规模分布式电源的发展^[1-2]。当前, 我国中低压配电网户用光伏并网数量快速增长, 并网容量也不断提高。高比例光伏并网对中低压配电网产生了显著的影响, 当分布式光伏渗透率较高

时易出现逆向潮流, 进而导致电压越限^[3-5], 源荷不确定性带来的网络运行不确定性增加^[6], 节点电压波动频繁。高比例光伏并网后导致配电网面临诸多风险, 因此研究高比例光伏接入下的配电网电压控制, 降低光伏接入带来的不良影响成为当前亟待解决的问题^[7]。

本文分析了传统配电网电压控制策略, 在此基础上提出新型配电网电压控制策略, 即基于光伏逆变器的功率因数、功率和电压的综合电压控制方法, 并通过实际配电网算例进行仿真验证, 仿真结果表明该方法具有良好的电压控制效果, 可有效提高电压合格率, 保障配电网安全稳定运行。

1 传统配电网电压控制策略分析

1.1 传统配电网调压设备及电压控制策略

1.1.1 传统调压设备

在传统配电网及分布式电源渗透率较低的配电

基金项目: 面向源荷非确定性的有源配电网分层协调控制研究(国家电网公司科学技术项目)。
收稿日期: 2024-08-19

网运行过程中,所涉及的调压设备通常包含有载调压变压器(OLTC)、无功补偿装置、分段开关或联络开关。

其中,无功补偿装置主要包含并联电容器组(SCB)、静止无功补偿装置(SVC)、静止无功发生器(SVG)以及静止同步补偿器(STATCOM)。并联电容器组在成本方面有明显优势,是目前最为常用的无功补偿装置,SVC、SVG以及STATCOM的调节效果及功能优于并联电容器组,但成本较高,目前正在配电网领域推广。

SVG相较于SVC主要有以下优点:1)响应速度快,SVC的响应速度通常在1s以内,而SVG的响应速度通常不超过5ms;2)SVG的低压特性明显优于SVC,其输出无功电流基本不受电压水平影响;3)谐波特性,SVC利用电容器进行无功补偿,不仅受到系统谐波影响大,而且自身会产生谐波,须配套采用电抗器,滤除SVC自身产生的谐波含量,而SVG采用三电平单相桥技术,单相可输出5电平电压波形,采用载波移相的脉冲调制方法,不仅受系统谐波影响小,还可以抑制系统的谐波。但SVG包含较多IGBT等电力电子元件,成本远高于SVC,如何正确地选择SVG使用场合,或者合理搭配SVG+SVC组合使用,从而经济实用的达到无功补偿要求,目前已成为无功补偿调压策略的研究需求之一。

分段开关和联络开关主要用于通过网络拓扑重构的方法进行系统电压调节。

1.1.2 传统配电网电压控制策略

网络拓扑重构。网络拓扑重构是集中式电压控制的一种方法,配电主站通过控制分段开关和联络开关的通断,改变网络拓扑以达到改变线路电压分布、线损等的目的。该方法调节具有较大的电压调节能力,但调节响应速度较慢。

OLTC—有载调压变压器分接头调节与容/感性设备投切组合操作。传统配电网变电站中的电压无功综合控制系统一般进行下述基本操作:无动作、变压器分接头升档、变压器分接头降档、投容/感性设备、退投容/感性设备,即“五区图控制原理”。根据当前运行工况下电压 V 与无功 Q 的实际情况进行5种操作的选择。该方法也是目前最为常用的无功-电压控制方法,通常涵盖10~110kV的中高压配电网等级。其中,电容器组、电抗器组、无功补偿装置一般布置在110kV/35kV主变低压侧、

35kV/10kV主变低压侧,配合分接头调整,实质上仍属于集中式电压控制方式。其主要缺陷是电压与无功之间的耦合关系考虑较少,同时几乎不能覆盖到低压配电网。

2 基于光伏逆变器的新型配电网电压控制策略分析

大规模分布式光伏接入配电网背景下,除传统配电网承载力提升手段外,还可借助光伏逆变器的可用无功容量,为配电网电压调节给予无功功率支持,限制系统电压越限,从而使得分布式光伏电源能够有效参与电网互动,对配电网承载力的提升做出积极贡献。随着大量分布式光伏电源的并网,光伏逆变器调整策略对配电网现有承载力提升的影响越发不可忽略,光伏逆变器主动参与调节将是新型配电系统运行控制最为重要的手段。

光伏逆变器的控制策略通常有功率因数控制、功率控制、电压控制等。除了单位功率因数控制策略,其他控制策略均是通过调节光伏逆变器的无功功率,以保证光伏并网点(POC)或公共连接点(PCC)电压在允许运行范围内。

2.1 功率因数控制

高比例光伏集群功率因数控制策略分为2种:

1)单位功率因数控制($\cos\varphi=1.0$):如图1所示,光伏以最大功率点跟踪模式(MPPT)运行,不进行无功调节,逆变器输出的无功功率为0;最大功率点跟踪(MPPT)的目的是使光伏电池始终工作在最大功率点,获取最大输出,提高效率。最大功率跟踪装置不断检测光伏阵列的电流电压变化,

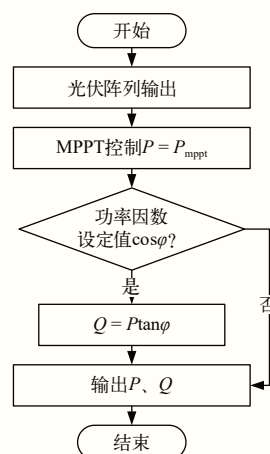


图1 定功率因数控制

并根据其变化对 DC/DC 变换器的 PWM 驱动信号占空比进行调节, 实现最大功率的跟踪。

2) 功率因数 ($\cos\varphi \neq 1.0$): 如图 2 所示, 根据光伏有功功率输出, 通过设定的功率因数自动计算无功功率的输出值, 以使光伏逆变器吸收或发出一定的无功功率, 功率因数既可超前亦可滞后。功率因数跟踪控制为通过监测并网点有功、无功、功率因数等数据, 根据一定的规则 (如 $P-\cos\varphi$ 曲线), 计算并网点所需无功, 对逆变器输出无功大小进行合理调整。

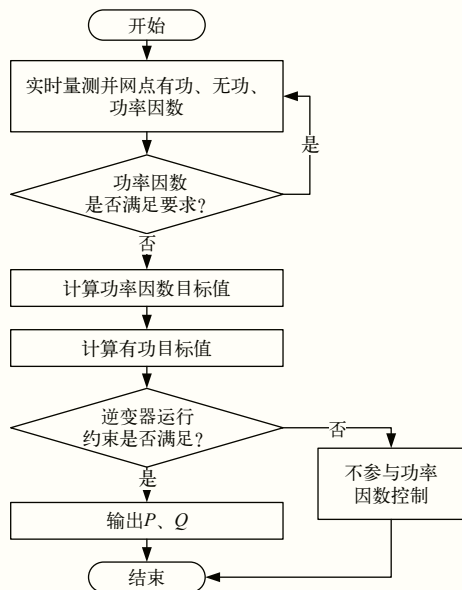


图2 功率因数控制

2.2 功率控制

高比例光伏集群功率控制策略分为有功控制和无功控制 2 种。

1) 有功控制: 控制原理如图 3 所示, 对光伏的有功功率进行统一控制, 当光伏有功输出过高, 影响并网点或电网正常运行, 如中午光伏大发。此时须对光伏有功进行控制, 使其按照系统最大允许功率输出有功。

2) 无功控制: 控制原理如图 4 所示, 对光伏的无功功率进行统一控制, 可向电网吸收或发出一定的无功功率。光伏并网逆变器功率因数应能在超前 0.95 至滞后 0.95 范围内连续可调, 光伏逆变器无功控制可按照无功设定值从电网吸收无功或向电网发出无功。

2.3 电压控制

电压控制原理如图 5 所示, 电压控制指光伏逆

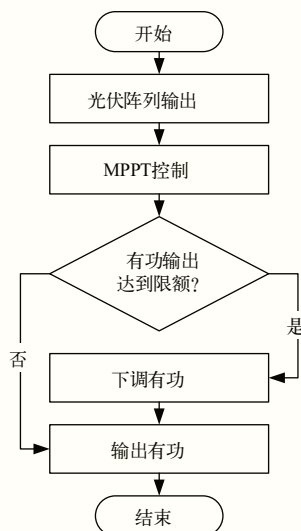


图3 有功功率控制原理

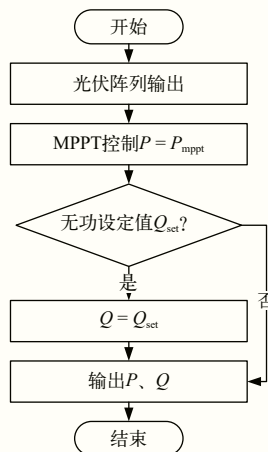


图4 无功功率控制原理

变器根据光伏并网点电压参考值, 在逆变器容量允许的范围内自动调节其无功或有功功率输出。与功率因数控制和功率控制相比, 该控制策略是直接根据光伏并网点电压水平进行自动调节, 以满足电网电压的安全约束。包括 $Q-V$ 控制与 $P-V$ 控制。其中, $Q-V$ 控制是光伏系统通过跟踪并网点电压, 根据 $Q-V$ 曲线 (见图 6), 调整相应的无功出力; 而 $P-V$ 控制则是光伏系统通过跟踪并网点电压, 根据 $P-V$ 曲线 (见图 7), 调整相应的有功出力。

电压控制可能存在的问题是调节不收敛, 如图 8、9 所示, 分别为逆变器 $Q-V$ 、 $P-V$ 控制曲线, 功率因数在超前 0.95 到滞后 0.95 范围内连续可调。进行电压集群控制后, 由于 $Q-V$ 控制的 BC、DE 段、 $P-V$ 控制的 BC 段无调节死区, 在大规模分布式电源并网场景下, 由于各并网点电压受到每一个光伏

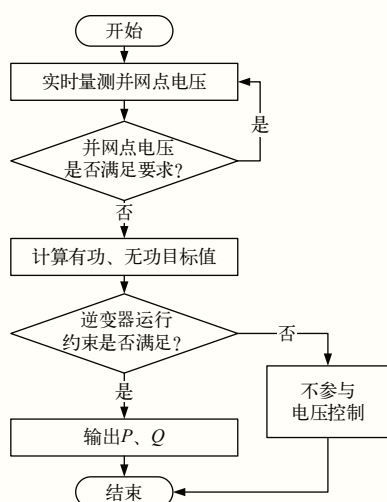


图5 电压控制原理

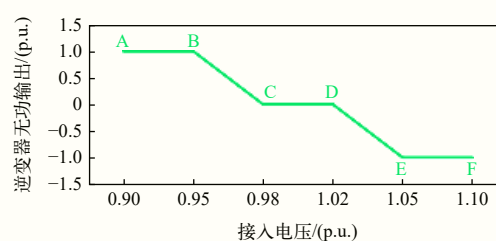


图8 Q-V控制模型与曲线图

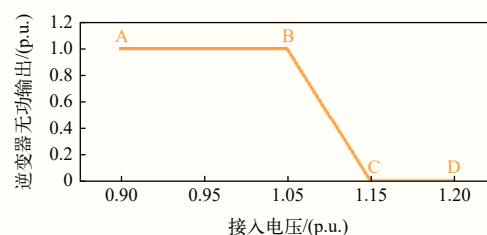


图9 P-V控制模型与曲线图

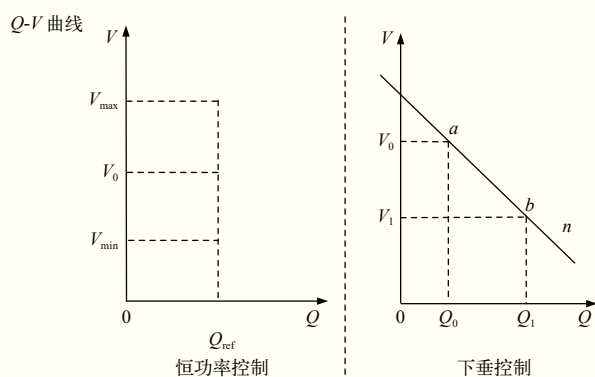


图6 典型的 Q-V 电压控制曲线图

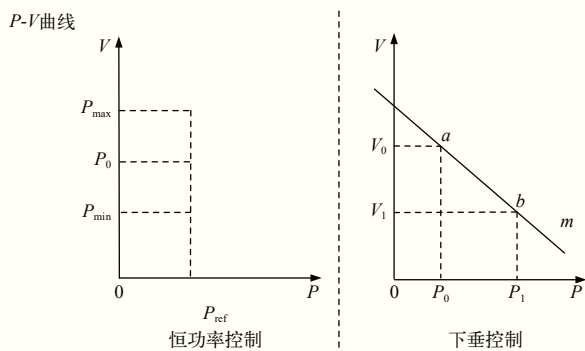


图7 典型的 P-V 电压控制曲线图

逆变器调节的耦合影响,可能会导致逆变器频繁调节(即使改变控制曲线仍可能发生此问题),无法稳定,在实际场景中应用较难。

3 算例分析

以图10所示 35 kV/10 kV/380 V 中低压配电网为例进行算例实验,该算例包含 3 条 10 kV 中压馈

线,6 个低压台区。

对比分布式电源接入前后中低压配电网各节点电压情况,如图11所示。图11(a)为中压台区各节点电压分布曲线,图11(b)为低压台区各节点电压分布曲线,其中 1-a 到 6-a 代表分布式电源接入后,1-b 到 6-b 代表分布式电源接入前各节点电压水平。通过仿真结果可以看出,分布式电源接入前中低压台区电压均处于正常运行水平,接入后低压台区多个节点面临电压越限问题,最高电压标么值达到 1.173。

单一控制策略往往控制效果也比较单一,将多种控制策略进行结合,能达到更好的调控效果。光伏运行状态如表1所示,将中压台区光伏逆变器策略设置为单位功率因数控制,1~6 低压台区光伏逆变器策略设置为-0.95 功率因数控制。

对采用综合控制策略的电压进行仿真分析,结果如图12所示。控制后,中压台区电压水平整体接近标么值,低压台区无电压越限情况发生,控制效果较好。

将中低压台区光伏逆变器策略设置为-10 kW 无功控制,控制后发现低压台区 4、5 节点电压发生越限,进一步对低压台区光伏逆变器增加有功削减 60% 的控制策略,仿真结果见图13。

可以看出,无功+有功综合控制后,中压台区电压水平整体接近标么值,低压台区无电压越限情况发生,控制效果较好。

通过综上实验分析可以发现,大量分布式光伏

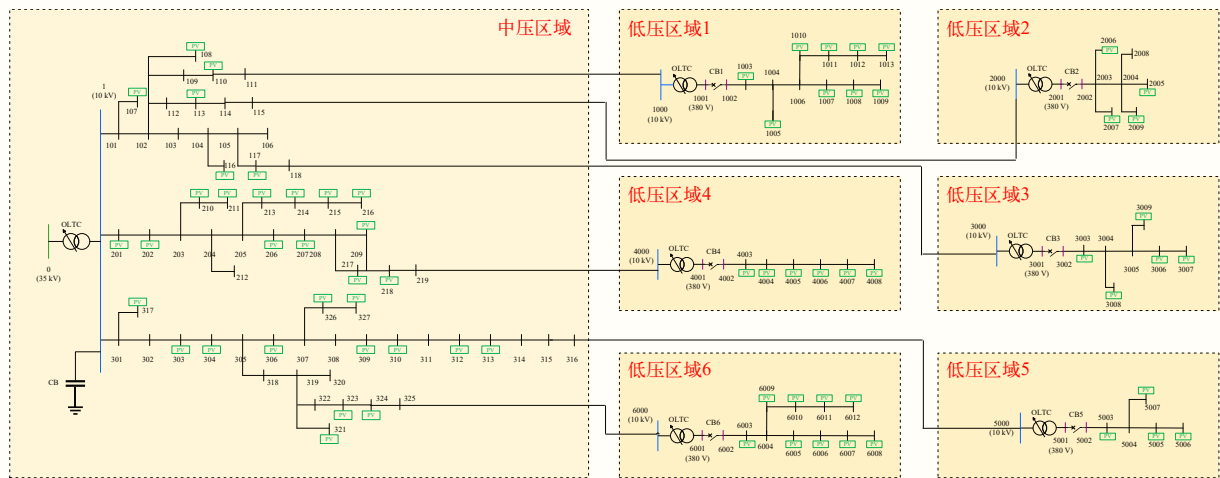


图10 35 kV/10 kV/380 V 中低压配电网算例

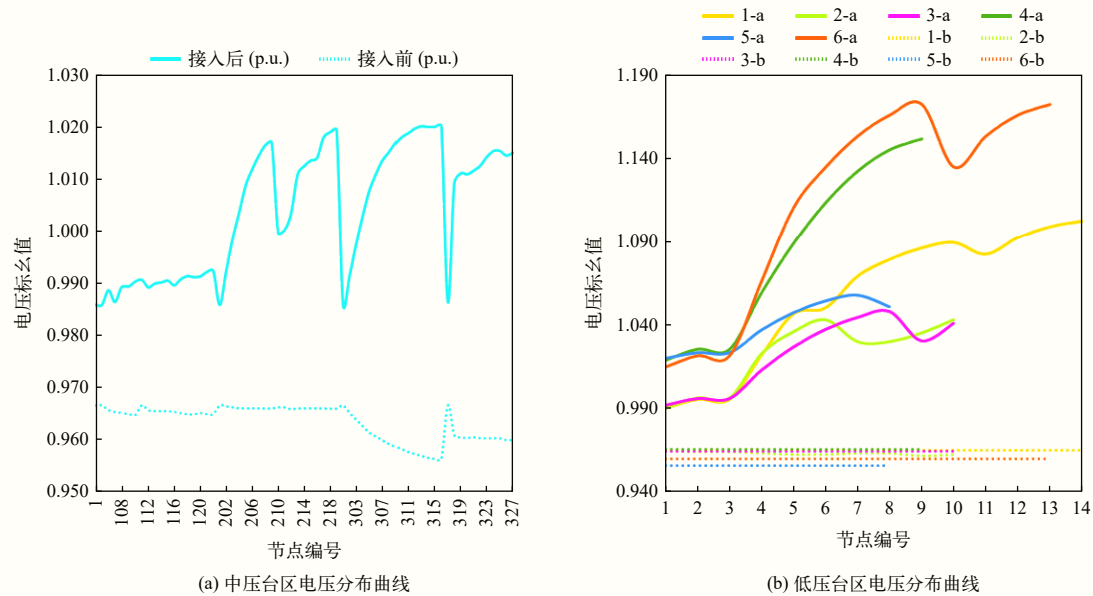


图11 分布式电源接入前后电压曲线图

表1 光伏运行状态

区域		光伏容量	控制模式	有功输出	无功输出
中压台区		400	$\cos \varphi = 1$	400	0
低压台区	1	40	$\cos \varphi = -0.95$	40	-12.5
	2	80	$\cos \varphi = -0.95$	80	-25.0
	3	40	$\cos \varphi = -0.95$	40	-12.5
	4	80	$\cos \varphi = -0.95$	80	-25.0
	5	40	$\cos \varphi = -0.95$	40	-12.5
	6	80	$\cos \varphi = -0.95$	80	-25.0

电源并网后对配电网的控制须考虑 2 种典型场景：一是光伏发电功率最大时段的场景，二是光伏发电功

率无法被所在供区负荷完全消纳，产生倒送功率最大时段的场景。有效的运行控制策略应能经受此 2 种极端运行场景的考验，满足电网运行的安全约束。

在高比例分布式光伏配电网中，光伏逆变器功率因数控制策略的不足在于：1) 合适的恒功率因数数值难以确定；2) 根据光伏出力时序变化的变功率因数曲线更难确定，逆变器控制策略实现复杂。有功/无功控制的优点在于，功率可以解耦控制，但集群控制策略下，每一个光伏逆变器均会参与调控，可能会造成控制资源的浪费。 $P-V/Q-V$ 控制的优点在于，仅接入点电压越限的光伏逆变器参与调节，通过分布式光伏电源本地的电压下垂控制，可实现光伏并网点电压的就地化控制，但控制策略较为复

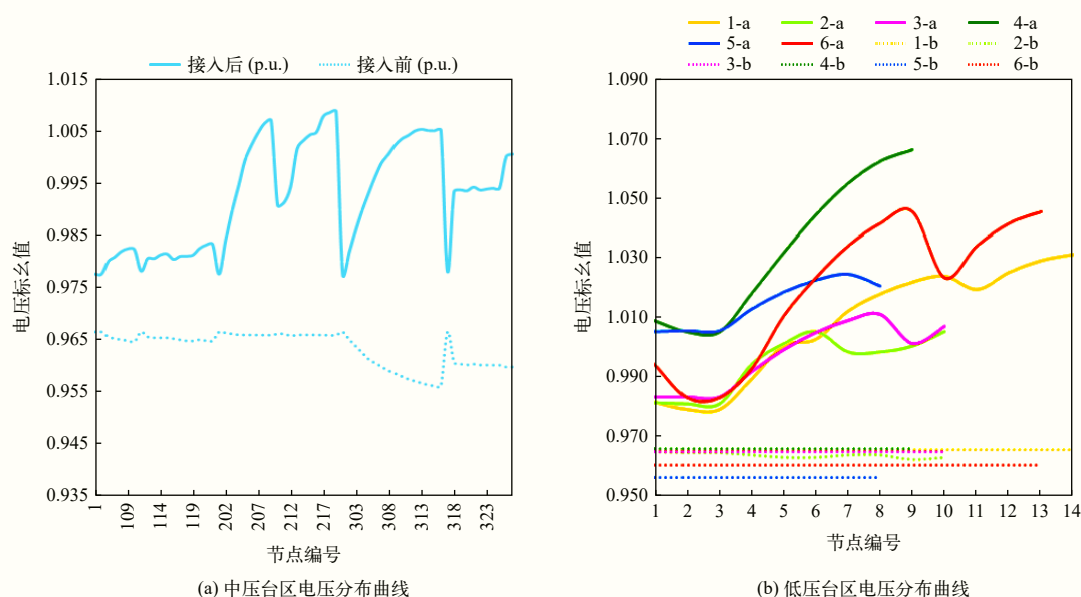


图12 综合控制结果

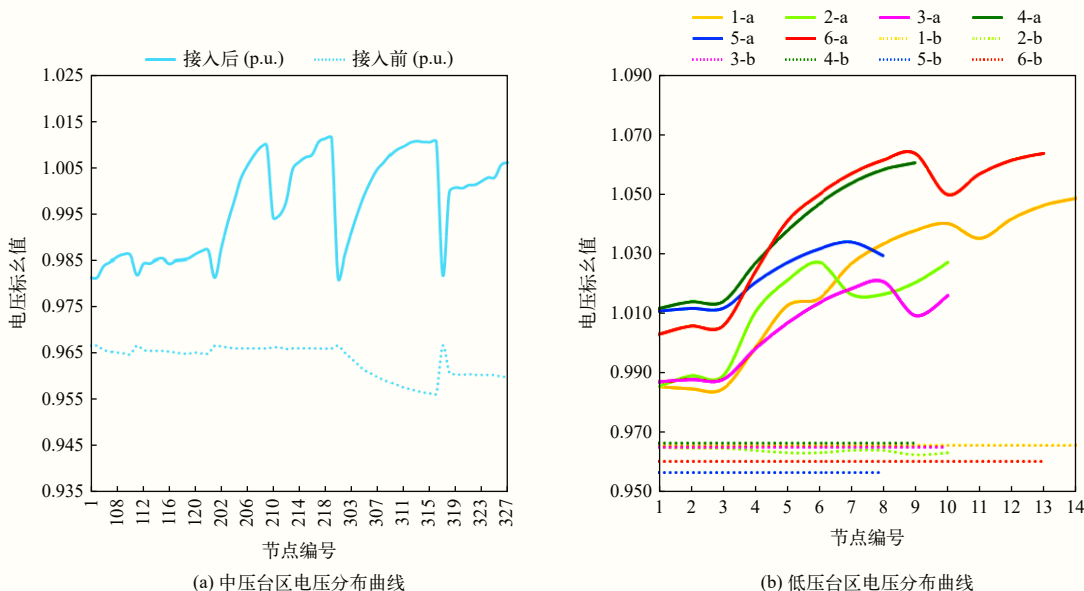


图13 P-V控制结果

杂, 需要结合一定的优化/松弛策略。

当大量的分布式光伏电源并网后, 可首先借助光伏逆变器的可用无功容量, 限制系统电压的升高, 在此基础上增加馈线级、变电站级的综合控制手段, 使得网络达到最佳的运行状态。

4 结束语

本文提出新型配电网电压控制策略, 即基于光伏逆变器的功率因数、功率和电压的综合控制方法, 并通过实际算例验证了该方法的有效性, 该方法充

分利用了分布式光伏逆变器有功、无功调节容量, 能有效缓解分布式电源接入后的电压越限和有功反送问题, 提高了大规模有源配电网运行的安全性。

参考文献

- [1] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨[J]. 高电压技术, 2021, 47 (8): 2751-2759.
- [2] 胡迪, 丁明, 毕锐, 等. 光伏和风电互补性对高渗透率可再生能源集群接入规划影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 40 (3): 821-835.

(下转第15页)

表1 W23 线路供电明细

kW·h

电能表	计量点类型	5月1日0:00 电能表示数	6月2日0:00 电能表示数	计量 倍率	计量电量
W23	关口表	1 158.51	1 225.19	16 000	1 066 880
W23反向	关口表	0.63	2.44	16 000	28 960
SL1	普通用户	990.13	1 038.48	50	$2 417.5 + 1 904.64(\text{变损}) = 4 322.14$
SL2	普通用户	6 791.32	6 835.38	50	$2 203 + 1 904.64(\text{变损}) = 4 107.64$
SL3	普通用户	14 580.16	14 677.48	8 000	778 560
SL4	普通用户	64.70	69.08	3 000	3 140
SL5	普通用户	4 429.44	4 444.29	50	$742.5 + 1 904.64(\text{变损}) = 2 647.14$
SL6	含光伏用户	1 025.66	1 058.79	10 000	331 300
SL6反向	含光伏用户	13.36	42.99	10 000	296 300
SL7	普通用户	1 711.09	1 752.54	120	$4 974 + 3 740.16(\text{变损}) = 8 714.16$
SL8	普通用户	442.25	539.33	800	77 664
SL9	普通用户	0.47	1.03	30	$16.8 + 1 305.6(\text{变损}) = 1 322.4$
SL10	普通用户	8.44	8.44	30	$0 + 1 305.6(\text{变损}) = 1 305.6$
SL11	普通用户	117.33	153.12	600	21 474
SL12	普通用户	378.97	692.17	120	$37 584 + 3 740.16(\text{变损}) = 41 324.16$
SL13	普通用户	466.08	779.44	120	$37 603.2 + 3 740.16(\text{变损}) = 41 343.36$

参考文献

- [1] 濮贤成, 唐述正, 罗新, 等. 线损计算与管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 赵全乐. 线损管理手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 仇继扬, 李涵, 王泽忠, 等. 含分布式光伏的低压台区三相线损理论计算方法研究及其应用[J]. 供用电, 2023, 40(11): 69-75.
- [4] 王赞. 输电线路统计线损异常成因研究及治理[D]. 华中科技大学, 2020.
- [5] 周波, 郝圣伍, 许长乐, 等. 低压分布式光伏对营销线损管理影响探讨[J]. 农村电气化, 2023(6): 86-89.
- [6] 韩平平, 陈思远, 张楠, 等. 考虑分布式光伏的低压台区线损异常辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 140-148.

作者简介

邓得政(1992—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能计量与用电信息采集等工作, E-mail: dezhen.deng@qq.com.

(责任编辑: 袁航)

(上接第11页)

- [3] 刘科研, 盛万兴, 赵鹏杰, 等. 基于一致性算法的跨台区光伏分布式控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4431-4439.
- [4] 詹惠瑜, 刘科研, 盛万兴, 等. 有源配电网故障诊断与定位方法综述及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 660-671.
- [5] 高鹏程, 王蕾, 李立生, 等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 190-196.
- [6] 张克勇, 王冠瑞, 耿新, 等. 含高比例光—储单元的主动配电网并网功率分布式协同控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 147-155.
- [7] 俞智鹏, 汤奕, 戴剑丰, 等. 基于有功自适应调整的光伏电站无功电压控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1900-1907.

作者简介

康田园(1989—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配

电网运行状态分析、城市电网建模仿真、分布式电源并网仿真等, E-mail: ktyzzu@163.com.

詹惠瑜(1994—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网数据处理、运行状态分析、故障诊断等, E-mail: zhanhy@epri.sgcc.com.cn.

贾东梨(1982—), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 从事配电网仿真与运行分析等方面的研究工作, E-mail: jiadl@epri.sgcc.com.cn.

叶学顺(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事虚拟电厂建模分析、分布式能源并网控制等方面的研究工作, E-mail: yexueshun@epri.sgcc.com.cn.

李昭(1993—), 男, 博士, 工程师, 从事分布式电源配电网运行控制、复杂有源配电网仿真分析, E-mail: lizhao1@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑: 袁航)