

含分布式光伏电站接入的配电网三级电压控制系统设计

潘琪¹, 徐洋¹, 高卓²

(1. 江苏省电力公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215000; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 为了对分布式光伏电站接入点电压进行有效控制, 给出了一种含分布式光伏电站接入的配电网三级电压控制系统设计方法。通过对分布式光伏电站特点的分析, 从系统结构、控制模式、数据通信、控制策略等方面对电压控制系统的设计方法进行了详述。工程算例结果表明, 基于智能分区控制技术的光伏电站电压控制系统设计方法是有效和实用的。该系统对并网点电压、站内电压、功率因数进行多目标优化, 可实现分布式光伏电站电压的综合协调智能控制, 大大提升分布式光伏电站的并网友好性。

关键词: 分布式光伏电站; 配电网; 并网点; 电压自动控制; 智能分区控制

Design of three level voltage control system in distribution network with the connection of many distributed photovoltaic power plants

PAN Qi¹, XU Yang¹, GAO Zhuo²

(1. Jiangsu Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: A schema of three level automatic voltage control system in distribution network with the connection of many distributed photovoltaic power plants is introduced. Through the analysis on the characteristics of distributed photovoltaic power station, the system structure, control mode, data communication, the design method of voltage control strategy is introduced in detail. The engineering examples show that, the design method of PV power station voltage control system of intelligent control technology based on partition is effective and practical. It can optimize the PCC voltage, power factor, and can make distributed photovoltaic power plant more friendly and efficient.

Key words: distributed PV power station; distribution network; PCC; AVC; intelligent zoning control

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0064-05

0 引言

分布式光伏电站大多建在负荷集中地区, 以就地消纳为主, 当前分布式光伏发电系统的总容量比较小, 但是随着国网公司《关于做好分布式光伏发电并网服务工作的意见》^[1]的正式发布, 分布式光伏发电的并网工作得到进一步推动, 在 6 MW 以下分布式光伏免费接入的政策刺激下, 并网光伏发电系统的装机容量以及数量都将迅速增长, 会有大量的分布式光伏接入配电网, 以苏州为例, 目前并入苏州电网的光伏电厂有 4 座, 容量共 15.12 MW, 2013 年新增装机达到 100 MW 以上。

受外界天气影响, 光伏电站的输出功率容易出现大起大落现象, 这种并网功率的随机性和波动性会使得配电线路负荷潮流不断发生大的变化, 使电压调整变得很困难。大量分布式光伏的接入, 将导

致这种影响放大, 在《DL_征求意见稿_分布式电源接入电网技术规定》^[2]和《GB_征求意见稿_光伏电站监控系统技术要求》^[3]中已明确要求, 并网的分布式电源和光伏电站监控系统需要具备无功电压控制能力。因此研究高渗透率的分布式光伏发电系统接入城区配网后的 PCC (Point of Common Coupling) 电压无功控制方案, 在管理上和技术上都可以积极促进分布式光伏发电系统的健康接入及发展。对稳定 PCC 电压、降低高渗透率光伏电站并网后对配电网的影响有积极意义。

分布式光伏电站接入配网有其特殊性, 需要单独进行技术的适用性研究。目前有部分文献针对分布式电源接入配电网带来的电压控制问题进行了研究。文献[4]指出大量分布式光伏电源的接入会升高接入点电压, 引起电压波动。文献[5]指出在发生潮流倒送时, 光伏发电系统与变电站之间的电压降会

梯度地变化, 通过调节变压器的调压开关可以予以修正, 还需与光伏发电系统和无功补偿装置配合使用。文献[6]和文献[7], 对分布式电源接入配电网后主站侧的电压无功控制策略进行了研究; 文献[8]中介绍了在大规模并网光伏电站中应用的一种 AVC 控制系统, 该系统以单一控制目标为限制条件, 按照相似调整裕度的方法实现逆变器间的无功分配。文献[9]则提供了一种基于免疫记忆克隆选择算法的多目标无功优化方法。

以上文献为我们分析了分布式光伏的接入对电网带来的电压影响和一些解决方法, 与这些文献不同, 本文针对分布式光伏电站的特点, 立足于工程实践经验, 研制了一种基于智能分区控制技术的电压无功自动控制系统, 对含分布式光伏电站接入的配电网提出了电压的三级控制模式, 考虑了 PCC 电压、站内电压、功率因数的多目标优化, 实现了分布式光伏电站 PCC 电压的综合协调智能控制。

1 分布式光伏电站的特点

与大规模并网型光伏电站相比, 分布式光伏电站具备以下特点:

1) 输出功率相对较小: 一般而言, 一个分布式光伏发电项目的容量在数千瓦以内, 分布式光伏电站的功率波动对配电网的影响很小。

2) 电能就地消纳: 分布式光伏发电接入配电网, 大部分电能可就地消纳, 发电用电并存。

3) 信息孤岛: 分布式光伏电站大多不具备与调度的通信能力、分布式光伏电站成为游离在调度控制范围之外的离散电源。

4) 无功支撑能力被浪费: 分布式光伏电站的逆变器基本以最大功率跟踪模式运行, 即功率因数为 1, 有功最大, 不发无功的模式, 这种运行模式是对光伏逆变器动态无功支撑能力的一种严重浪费。

5) 可调的电压无功设备: 分布式光伏电站中以光伏逆变器为主, 由于接入电网电压较低, 所以站内基本不配置有载调压变压器。如表 1 所示, 与常

表 1 电压无功控制手段对比表

Table 1 Voltage control ways comparison

调整手段	火电厂 水电站	变电站	光伏 电站
发电设备	•		•
SVG/SVC		○	•
有载调压变压器		•	•
并联电容器组		•	•
并联电抗器组		•	•

规电厂、变电站相比, 光伏电站的可调电压无功设备最多最全, 这也就意味着光伏电站的电压无功策略最复杂。因此有必要开发针对光伏电站的电压无功控制系统, 经济合理地调控这些设备, 以满足其电压控制需求。

针对分布式光伏电站的上述特点, 光伏电站并网点电压控制系统必须具备以下功能:

1) 具备与调度或上级变电站的通信能力;

2) 无功调整手段以逆变器控制为主;

3) 以不影响发电功率为前提, 充分利用逆变器无功, 达到电压控制的目的。

综上, 光伏电站电压控制系统需要根据调度下发的母线电压目标值, 通过采集的母线电压、母线无功等实时数据, 计算并预测出在设定目标电压值下应从母线注入电网的无功或预先设定的无功控制预案表, 对光伏电站的主变、无功补偿设备、逆变器等进行无功控制, 确保光伏电站并网点电压无功满足要求; 当光伏逆变器组因故脱网时, 快速切除光伏电站的无功补偿设备, 防止电网过电压的产生。

2 智能分区控制技术

所谓智能分区, 是指控制系统根据并网电压、厂用电电压、功率因数、逆变器健康状况等多控制目标的上下限来划分区域, 每个区域按照当前实时点所属区域的预定策略进行动作。分区控制策略与传统的 AVC 控制策略不同, 充分考虑了安全性、经济性、稳定性等原则, 实现光伏电站电压的多目标协调优化控制。本文介绍的系统就采用了这种技术, 结合分布式光伏电站的实际应用进行实现, 并取得了良好的控制效果。

3 系统实现

3.1 系统结构

如图 1 所示, 光伏 AVC 电压控制系统通过通信管理机和逆变器进行通信, 获取当前每个逆变器的实时工作状态、实发有功、实发无功等信息, 在满足各项限制条件的前提下, 根据设定的母线电压值或由省中调给定的各站无功功率或电压曲线及安全运行约束条件, 以迅速、经济的方式控制光伏电站的总无功功率, 维持并网点电压在给定的范围内变化, 使其满足电力系统需要, 达到光伏电站经济、安全、高效运行的目的。

3.2 三级控制模式

分布式光伏电站典型接线图如图 2 所示, 光伏电站升压至 10 kV 后通过 10 kV 线路并网, 并网点既有电源也有负荷, 是分布式光伏电站的特点。

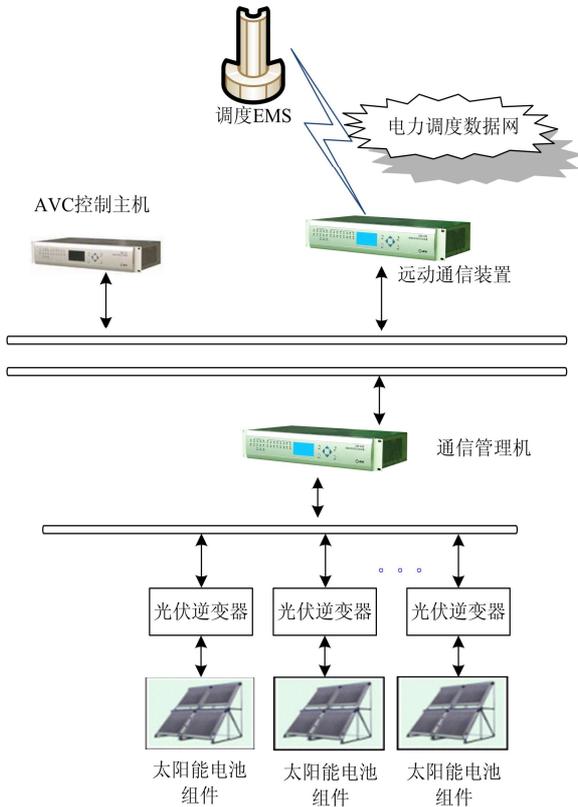


图1 系统结构图

Fig. 1 System structure of AVC in distributed PV

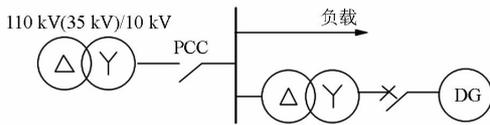


图2 分布式光伏电站典型接线图

Fig. 2 Typical single line diagram of distributed PV

从上面的分析可以看出，多个分布式光伏电站通常通过一个升压站并入电网，因此为提高无功控制效率，分布式光伏电站并网点的电压无功控制宜采用调度—变电站—光伏电站的三级控制模式。如图3所示，负荷变电站接收调度指令，以控制站内有载调压变压器、容抗器组、光伏电站无功出力为手段，达到控制低压侧负荷母线电压的目的。光伏

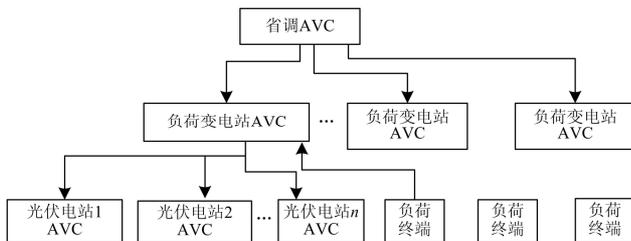


图3 三级控制模式

Fig. 3 Three level control mode

电站接收负荷变电站发送的改变无功指令，由光伏电站无功控制系统对站内光伏逆变器进行无功分配，控制并网无功，进而达到改变并网点电压的目的。

3.3 数据通信

为实现光伏电站的自动电压控制功能，并网光伏电站需要安装能够自动采集、记录、远程传输光伏电站各类电气参数和气象参数的采集装置。光伏电站向电网提供的监测信息至少应包括以下内容：

- 1) 光伏电站是否并网的状态信息；
- 2) 光伏电站并网点有功功率、无功功率、功率因数、电压电流；
- 3) 变压器分接头档位、断路器位置。

采用10 kV或35 kV线路并网的光伏电站能接受的电网调度控制令应包括：有功功率、电压无功调节方式、并网点参考电压、光伏电站停机指令。

数据通信系统应能满足继电保护、安全自动装置、调度自动化和有关状态信息的传输要求。采用10 kV或35 kV线路并网的光伏电站，其通信通道应采用光缆通信方式接入电力调度通信网；采用400 V线路并网的光伏电站，其通信通道可选用专用通道、以太网络以及GPRS等。

3.4 就地控制策略

AVC自动电压控制系统算法基本流程如图4所示。由于电压指标为监视量，当目标电压和实际电压有偏差时，需要根据系统阻抗计算出系统需要改变的无功，而系统阻抗和系统运行方式有关，系统阻抗自动辨识可采用如下方式实现，系统阻抗的计算公式如式(1)所示。

$$X = \frac{V_+ - V_-}{\frac{Q_+}{V_+} - \frac{Q_-}{V_-}} \quad (1)$$

式中： V_- 为前次计算系统阻抗时的母线电压； Q_- 为前次计算系统阻抗时的母线送出的总无功； V_+ 为本次计算系统阻抗时的母线电压； Q_+ 为本次计算系统阻抗时的母线送出的总无功。

可采用逐步逼近法计算系统阻抗。因为系统阻抗仅在母线电压变化时可计算出，若高压母线电压长时间波动很小、或保持在一稳定的电压值附近，系统阻抗无法计算出，此时有必要取上限做相应处理。开始计算时，可以设置一个系统阻抗的上限值作为初始值，通过若干次调节后就即可求得比较准确的系统阻抗，初始值的不精确并不影响最终逐步逼近的调节结果。在具体的阻抗计算中，要适当选取

采样间隔, 否则计算结果会与实际偏差较大。

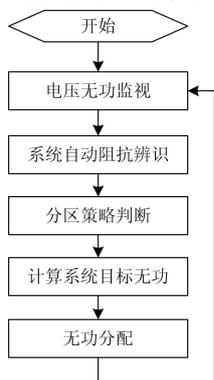


图 4 分布式光伏电站 AVC 控制算法流程图

Fig. 4 Flowchart of AVC in distributed PV

3.4.1 智能分区控制

分布式光伏变电站 AVC 的基本控制策略综合考虑了站内功率因数、并网点电压、场内电压等因素, 实现了多目标协调控制: 站内控制策略采用智能分区控制策略实现对无功和电压的分配。

所谓智能分区控制是指在传统九区的基础上, 把厂用电电压作为控制目标, 叠加在传统九区之上, 根据无功功率、电压、厂用电电压三个调节目标实现的无功经济协调控制。策略的实现过程中会涉及到边界设定、区域策略、如何避免动作震荡等一系列工程实际问题。

控制策略的目标是根据当前电压所处的位置确定控制手段, 在满足双九区的策略的前提下, 首先应当满足 PCC 电压处于合理的范围内, 当处于常规控制策略区域则采用以厂用电电压为控制目标的常规九区控制策略进行电压无功控制。

考虑到并网点母线电压 PCC 的边界限制条件, 加上厂用电母线电压的上下限边界, 则可以形成如

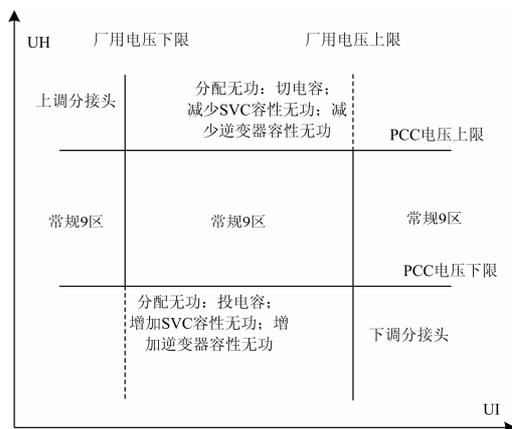


图 5 智能分区控制

Fig. 5 Double nine area control schema

图 5 所示的双 9 区图控制方案: 当并网点电压正常时, AVC 按照常规的 9 区进行控制; 当并网点电压不正常时, 按照如下的 9 区逻辑进行控制。

1) PCC 电压越上限

厂用电电压越上限, 则不考虑无功优化问题, 下调无功; 厂用电电压正常, 下调无功; 厂用电电压低于(下限 + ΔU_q), 则上调分接头;

2) PCC 电压越下限

厂用电电压高于(上限 - ΔU_q), 则下调分接头; 厂用电电压正常, 上调无功; 厂用电电压越下限, 则不考虑无功优化问题, 上调无功。

这种智能分区控制技术充分考虑了厂用电电压对设备的影响, 把经济运行指标纳入到系统的控制考虑因素中, 实现了分布式光伏电站中多目标综合控制。

3.4.2 逆变器无功分配策略

电压无功控制系统针对逆变器的无功分配策略可以有四种: 相似裕度法、时间轮循法、健康指数法、最优无功法。

相似裕度法^[4]是指, 在所有逆变器之间分配无功时, 根据各逆变器可增加的无功裕量, 按照相同的裕度对无功进行分配。分配无功计算公式为

$$Q_i = Q_{\text{target}} \frac{Q_{i\text{max}}}{\sum_{i=1}^m Q_{i\text{max}}} \quad (2)$$

式中: Q_{target} 为全厂目标无功; $Q_{i\text{max}}$ 为第 i 台逆变器无功上限; Q_i 为第 i 台逆变器应分配的无功。

由于逆变器的无功响应速度较慢, 导致当光伏电站容量较大, 逆变器个数较多时, 这种算法控制一圈下来, 周期过长, 严重影响电压调整效果, 因此在实际工程中并不多用。推荐使用健康指数法和最优无功法相结合的方式, 根据逆变器的健康指数和无功缺额, 寻找最佳动作的逆变器。可以大大降低每次参与调整的逆变器动作个数, 缩短电压调整周期。

4 算例分析

以江苏某 2 MW 分布式光伏电站为例, 该电站共有 4 个 500 kW 的光伏逆变器, 经 35 kV 并网, 经过并网测试, 可以得到如图 6 所示并网点电压控制跟踪曲线。表 2 给出了控制前后系统无功和电压变化的典型数据。由图表可看出, 分布式光伏电站的电压控制系统电压控制效果明显。

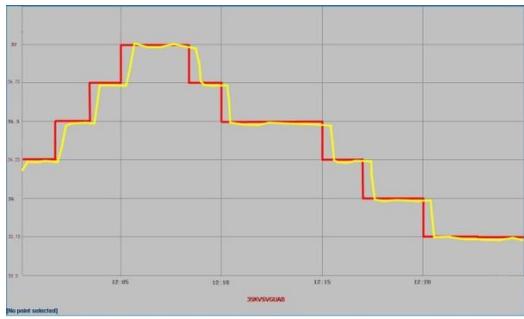


图 6 PCC 电压跟踪曲线

Fig. 6 PCC voltage tracking curve

表 2 控制实验前后数据对比表

Table 2 Voltage and reactive power comparison

序号	目标/ kV	无功变化			控制母线电压变化		
		试验前	试验后	变化量	试验前	试验后	用时/s
1	36.25	112	128	26	36.1	36.24	30
2	36.5	128	158	30	36.24	36.47	30
3	37	160	183	23	36.48	36.99	30

5 总结

本文所描述的电压控制解决方案可应用在小型光伏电站（包括屋顶光伏电站）与配电网之间的并网连接，面向企业光伏电能生产用户与企业电能消费用户。由于光伏电站单体规模小且分散的特点，从自动化配置方面加强对分布式光伏的管理和控制，对其实现综合自动管理，在光伏电站实施本文提出的基于智能分区控制的分布式光伏电站电压控制系统，可以促进光伏电站并入电网、提高光伏电站生产效率，提高分布式光伏的利用效率。无论对电网企业、电能生产企业还是电能终端用户来说都具有重要的意义。

分布式光伏电站的并网点 PCC 电压控制技术，目前还局限在稳态时的电压稳定控制上，但是，除了稳态下的电压控制，如何在电力系统暂态时进行光伏电站 PCC 电压的快速控制，是一个值得持续深入探讨的问题。

参考文献

[1] 国家电网. 关于做好分布式光伏发电并网服务工作的意见[S]. 2012.

[2] 标准函【2012】93号 DL_征求意见稿_分布式电源接入电网技术规定[S].

[3] 标准函【2012】97号 GB_征求意见稿_光伏电站监控系统技术要求[S].

[4] 赵波. 大量分布式光伏电源接入对配电网的影响研究

[J]. 浙江电力, 2010, 29(6): 5-8.

ZHAO Bo. A study on the impact of the large-scale distributed photovoltaic power on the distribution grid system[J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(6): 5-8.

[5] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.

CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.

[6] 程杉, 陈民铖, 黄薏宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 45-50.

CHENG Shan, CHEN Min-you, HUANG Yi-chen. Multi-objective reactive power optimization of distribution system penetrated with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 45-50.

[7] 王旭强, 刘广一, 曾沉, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.

WANG Xu-qiang, LIU Guang-yi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.

[8] 魏世贵, 刘双. AGC_AVC 在光伏电站的应用[J]. 江苏机电工程, 2013(2): 35-37, 42.

WEI Shi-gui, LIU Shuang. Application of AGC/AVC in photovoltaic power station[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(2): 35-37, 42.

[9] 罗毅, 多靖赟. 基于免疫记忆克隆选择算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 65-70.

LUO Yi, DUO Jing-yun. Multi-objective reactive power optimization based on immune memory colonial selection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 65-70.

收稿日期: 2014-01-07; 修回日期: 2014-02-24

作者简介:

潘琪(1976-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化;

徐洋(1976-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化;

高卓(1977-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源电站电压无功控制技术. E-mail: gaozhuo@sf-auto.com