

大型光伏电站无功电压控制研究

葛虎¹, 毕锐¹, 徐志成¹, 丁明¹, 任轲轲²

(1. 合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 2. 晋城供电公司, 山西 晋城 048000)

摘要: 为了满足光伏电站并网对公共连接点 (Point of common coupling, PCC) 无功电压控制要求, 基于九区图原理, 以 PCC 电压和功率因数均合格为最优控制目标, 针对 PQ 电源型和 PV 电源型的大型光伏电站提出了的无功电压控制策略。搭建了 PQ 电源型和 PV 电源型大型光伏电站的等效模型, 给出光伏电站无功电压控制策略实施流程图。以典型光伏电站出力 and 负荷动态变化为基础, 通过搭建一个含大型并网光伏电站的 110 kV 系统, 对光伏电站的无功电压控制进行仿真。仿真结果验证了所提策略的有效性和实用性。

关键词: 公共连接点; 电压; 功率因数; 大型光伏电站; 无功电压控制

Research on reactive power and voltage control of large-scale photovoltaic power station

GE Hu¹, BI Rui¹, XU Zhi-cheng¹, DING Ming¹, REN Ke-ke²

(1. Photovoltaic System Research Center of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Jincheng Power Supply Company, Jincheng 048000, China)

Abstract: To satisfy reactive power and voltage control requirements of grid-connected photovoltaic power station, setting the qualified voltage and power factor at the PCC as the optimal control objective, strategies based on nine-zone diagram for reactive power and voltage control are proposed to PQ-type and PV-type photovoltaic power stations. Equivalent models of PQ-type and PV-type photovoltaic power stations are built and the flowcharts for reactive power and voltage control strategies are presented. Based on the typical dynamic changes of photovoltaic power station output and load, a 110 kV system with large-scale photovoltaic power station for reactive power and voltage control is given and the results of simulation show that the proposed strategies are effective and practical.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A107).

Key words: point of common coupling (PCC); voltage; power factor; large-scale photovoltaic power station; reactive power and voltage control

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0045-07

0 引言

大型光伏电站在输电侧并网对常规电网的潮流大小和分布会产生影响, 并使电网各节点电压发生变化^[1-4]。相对于小型并网光伏电站通常只向电网输送有功功率, 不参与电网无功电压控制, 中型和大型并网光伏电站应具备根据 PCC 电压水平调节无功输出, 参与电网无功电压控制的能力^[5]。

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 项目: 2011AA05A107); 安徽省科技攻关项目 (12010202036); 国网 2012 科技项目《规模化光伏发电运行控制关键技术研究示范》

目前, 针对大型光伏电站无功电压控制的研究较少, 国内一些标准文件只给出了简单规定^[5]。文献[6]研究了不同容量的大型光伏电站对并网母线电压的影响, 指出光伏电站与外部电网间的线路阻抗是影响母线电压值的重要因素。文献[7-8]提出利用逆变器有功和无功解耦控制向电网提供无功补偿, 提高光伏电站低电压穿越性能。文献[9]研究光伏电站并网后广义负载功率波动、功率因数对配电网电压波动影响, 指出稳定并网点功率因数是提高电压稳定性的根本方法。文献[10-11]以电力系统有功网损最小为目标函数研究了含光伏电站的配电网无功优化问题。文献[12]研究了不同类型的分布式

电源对电网各节点电压的影响。以上文献研究具有如下特点：1) 把光伏电站看作一个独立电源或者只搭建光伏阵列和逆变器模型，没有考虑光伏电站内部线路、变压器损耗对电网的影响；2) 注重研究光伏电站对电网电压的影响和控制，没有涉及接入点功率因数的控制；3) 没有给出具体的无功电压控制策略；4) 采用单一的无功补偿装置，没有考虑多种补偿装置的综合调节；5) 仿真时负荷侧均为静态恒功率负荷模型，不能反映一天内负荷大小的实际变化。

本文将光伏阵列和逆变器等效为 PQ (PV) 可控等效电源，对包含变压器、汇集线路和送出线路的大型光伏电站进行了建模；针对 PQ 电源型和 PV 电源型光伏电站，提出了以电压和功率因数为控制

目标的无功电压控制策略；通过光伏电站逆变器、无功补偿装置 SVG 和主变压器的综合调节实现控制目标；考虑不同时刻光伏电站出力和负荷大小的动态变化，并以算例对所提策略进行了验证。

1 大型光伏电站建模

1.1 大型光伏电站并网系统结构

并网型光伏电站主要由汇集线路依次连接光伏阵列、逆变器、升压变压器至并网点(POI)，再经送出线路连接至 PCC。并网后电压测量点可选择 POI 或 PCC^[5]，本文选择 PCC 做为无功电压控制点。图 1 为通过二次升压集中并网方式接入 110 kV 电网的大型光伏电站典型系统结构图。

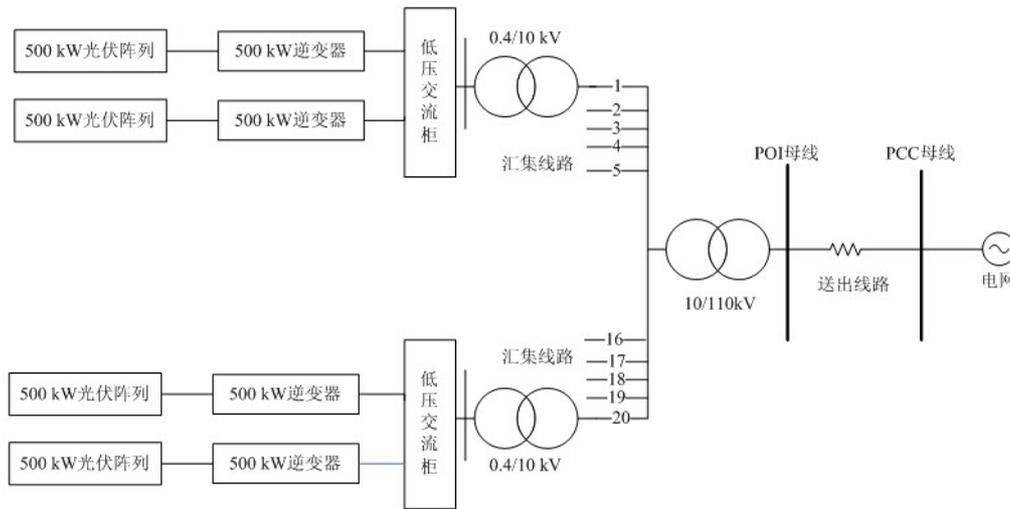


图 1 光伏电站二次升压并网

Fig. 1 Photovoltaic power station connected to the grid through two step-up transformers

1.2 光伏电站等效模型

(1) 光伏阵列和逆变器等效模型

根据潮流计算的要求，当逆变器采用电流源输出方式、恒功率控制策略时，光伏阵列和逆变器等效为 PQ 可控等效电源；当逆变器采用电压源输出方式、恒电压控制策略时，光伏阵列和逆变器等效为 PV 可控等效电源。如图 2 所示。

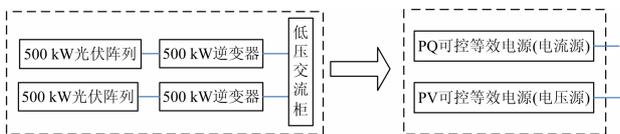


图 2 光伏阵列和逆变器等效示意图

Fig. 2 Equivalent schematic diagram of PV array and inverter

(2) 光伏电站交流一次系统

对电站交流一次系统不进行等效，具体参数以典型系统参数为准。

光伏电站等效模型由 PQ (PV) 可控等效电源和电站交流一次系统连接组成。

2 大型光伏电站无功电压控制策略

2.1 大型光伏电站无功电压控制系统结构

(1) 光伏电站无功电压控制系统的两种控制方案

1) 地区 AVC 给定 PCC 电压和功率因数值，光伏电站按照 AVC 的给定值投入无功电压控制系统。

2) 光伏电站采集 PCC 电压和功率因数测量值，根据预先设定的策略进行控制。

(2) 光伏电站无功电压控制系统实现方式

光伏电站无功电压控制的实现可分为就地控制和远方控制。就地控制为无功电压控制系统不经过

调度中心, 直接通过光伏电站无功电压控制装置进行控制。远方控制为光伏电站无功电压控制系统按照调度中心下达的指令进行无功电压控制。大型光伏电站无功电压控制系统结构主要包括远动终端 (RTU)、主站服务器、无功电压控制装置以及连接这些设备的通信网络^[13]。RTU 为调度中心和主站服务器的信息交接点。调度中心应能识别光伏电站类型, 下发 PCC 无功电压控制指令。无功电压控制系统主站接收调度中心下达的指令, 向无功电压控制装置 (SVG、逆变器、主变压器) 发送调节指令, 实现无功电压控制目标。光伏电站无功电压远方控制硬件总体框图如图 3。

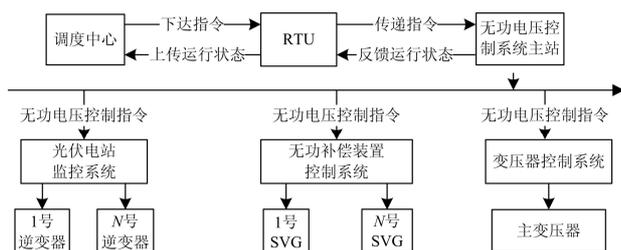


图 3 光伏电站无功电压远方控制系统结构图

Fig. 3 Reactive power and voltage remote control diagram of photovoltaic power station

2.2 PQ 电源型光伏电站站内无功电压控制策略

2.2.1 控制目标和手段

(1) 控制目标

PQ 电源型光伏电站接入电网会影响 PCC 电压和功率因数, 为了控制 PCC 电压合格和功率因数为 1, 同时考虑电压和功率因数不能同时满足控制要求的情况, 设置最优控制目标和次优控制目标。

1) 最优控制目标为 $U_L \leq U \leq U_H$ 且 $|\cos \varphi|=1$ 。

其中, U_H 、 U_L 、 $\cos \varphi_H$ 、 $\cos \varphi_L$ 分别表示 PCC 电压和功率因数上下限值。

2) 次优控制目标为 $U_L \leq U \leq U_H$ 。

(2) 控制手段

PQ 电源型光伏电站无功电压控制手段主要包括调节 SVG 补偿量和调节逆变器功率因数。考虑逆变器自身有较大的无功剩余容量, 无功补偿时优先调节逆变器, 其次为 SVG。由于变压器是通过改变系统无功功率分布来调节各节点电压, PQ 可控型电源提供的无功在设定后不变, 变压器调压效果不明显, PQ 电源型光伏电站不采用变压器调压方式。

2.2.2 控制策略

采用九区图控制策略^[14], 通过控制光伏电站无功电压控制装置实现上述控制目标。PQ 电源型光伏电站无功电压控制策略具体如下。

9 区: U 、 $\cos \varphi$ 均合格, 为不动作区 (最优控制目标区)。

3、7 区: U 合格, $\cos \varphi$ 越限, 调节 PQ 电源型光伏电站无功电压控制装置使 U 和 $\cos \varphi$ 均合格; 若不能, 为次优控制目标区。

1、5 区: $\cos \varphi$ 合格, U 越限, 调节 PQ 电源型光伏电站无功电压控制装置适当降低 $\cos \varphi$, 确保 U 合格 (3、7 区)。

2、4、6、8 区: $\cos \varphi$ 、 U 均越限, 首先调节 PQ 电源型光伏电站无功电压控制装置使 $\cos \varphi$ 合格 (1、5、9 区); 若 U 仍越限, 按 1、5 区控制策略确保 U 合格。

图 4 为 9 区图示意图。



图 4 九区图

Fig. 4 Nine-zone diagram

PQ 电源型光伏电站无功电压控制策略实施流程图如图 5。

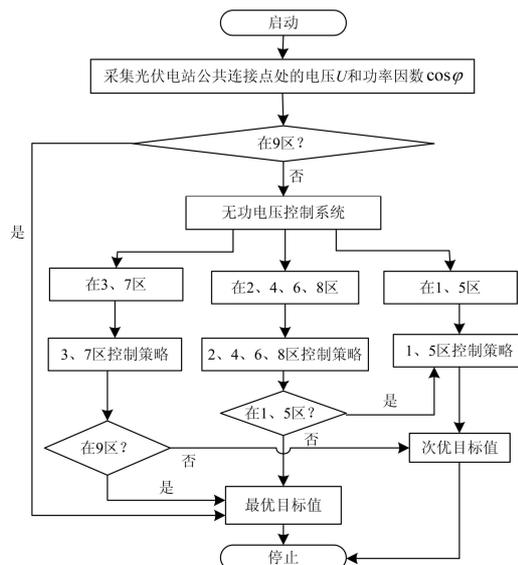


图 5 PQ 电源型光伏电站无功电压控制策略流程图

Fig. 5 Flowchart for reactive power and voltage control strategy of PQ-type photovoltaic power station

2.3 PV 电源型光伏电站站内无功电压控制策略

2.3.1 控制目标和手段

(1) 控制目标

PV 电源型光伏电站接入电网会影响 PCC 电压, 导致 PCC 功率因数一般较低。因此功率因数目标值可略微降低。

1) 最优控制目标为 $U_L \leq U \leq U_H$ 且 $0.99 \leq \cos \varphi \leq 1$ 。

2) 次优控制目标为 $U_L \leq U \leq U_H$ 。

(2) 控制手段

PV 电源型光伏电站无功电压控制手段主要包括调节 SVG 补偿量、调节逆变器交流侧电压和调节主变压器分接头, 调节顺序为逆变器优先、其次 SVG、最后变压器。

2.3.2 控制策略

同图 4, PV 电源型光伏电站无功电压控制策略具体如下。

9 区: U 、 $\cos \varphi$ 均合格, 为不动作区 (最优控制目标区)。

3、7 区: U 合格, $\cos \varphi$ 越限, 调节 PV 电源型光伏电站无功电压控制装置使 U 和 $\cos \varphi$ 均合格; 若不能, 为次优控制目标区。

1、5 区: $\cos \varphi$ 合格, U 越限, 调节 PV 电源型光伏电站无功电压控制装置适当降低 $\cos \varphi$, 确保 U 合格 (3、7 区)。

2、4、6、8 区: $\cos \varphi$ 、 U 均越限, 调节 PV 电源型光伏电站无功电压控制装置使 $\cos \varphi$ 合格; 若 U 仍越限, 按 1、5 区控制策略确保 U 合格。

PV 电源型光伏电站无功电压控制策略实施流程图如图 6。

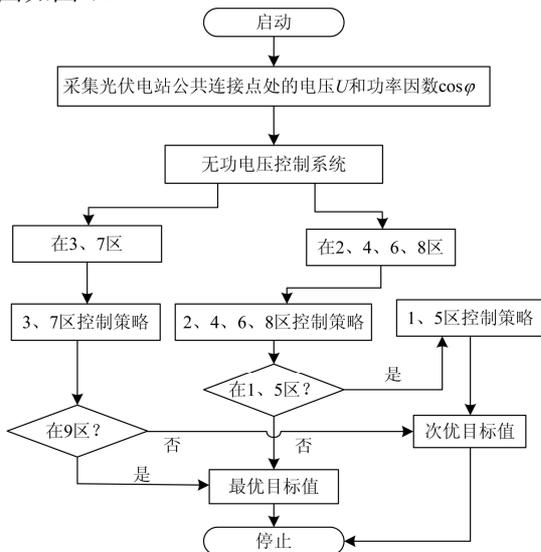


图 6 PV 电源型光伏电站无功电压控制策略流程图

Fig. 6 Flowchart for reactive power and voltage control strategy of PV-type photovoltaic power station

2.4 实施光伏电站无功电压控制策略需注意的问题

1) PQ 电源型光伏电站, 若改变逆变器功率因数, 使逆变器发出的无功抵消光伏电站内部系统无功损耗, 则不需要再投入 SVG 进行无功补偿; PV 电源型光伏电站控制前 PCC 功率因数一般较低, 初始测量值主要在 2、3、4、6、7、8 区。

2) PQ 电源型光伏电站调节各逆变器功率因数时采用等功率因数原则, 即每个逆变器的功率因数都相等。PV 电源型光伏电站调节各逆变器电压时采用等电压原则, 以此减少系统内部环流。

3) PCC 电压和功率因数不能同时满足要求时, 适当降低功率因数保证电压合格。该场景一般发生在傍晚用户负荷比较大、光伏电站有功出力又很小的时候。

3 算例分析

3.1 仿真系统

以图 7 三机-十节点系统为例, 使用 PSASP 软件搭建光伏电站并网模型。该仿真系统说明如下。

1) Bus11 为光伏电站 POI 母线, Bus3 为光伏电站 PCC 母线。母线 Bus3 以上部分为外部电网接线, Z3 为变电站负荷端, 外部电网各元件参数主要参见文献[14]。Bus3 以下部分为并网光伏电站内部系统结构。g1~g20 为光伏电站 20 个相同的发电单元, 光伏电站有功出力随时间变化特性参见文献[15]。t1~t20 为逆变器交流出口侧无励磁调压变压器, 11~120 为光伏电站内部系统汇集线路, T4 为有载调压主变压器, L7 为送出线路, 各元件参数参考国内某个大型光伏电站系统元件参数。C2~C5 代表无功值可调的 SVG 装置, 容量为 5 Mvar。

2) 仿真时间为 7:00 到 18:00, 光伏电站有功出力和负荷大小每小时改变一次。

3) 通过 35~110 kV 电压等级接入公共电网的光伏电站, 其 PCC 电压偏差为相应系统标称电压的 -3%~+7%。

3.2 仿真结果分析

光伏电站并网对 PCC 电压的影响如图 8。按照本文提出的光伏电站无功电压控制策略, PCC 无功电压控制前后电压和功率因数曲线分别如图 9 和图 10。

从图 8 可以看出, PQ 电源型光伏电站并网对 PCC 电压有小幅度的提升作用。PV 电源型光伏电站并网对 PCC 电压可以有较大幅度的提升作用。

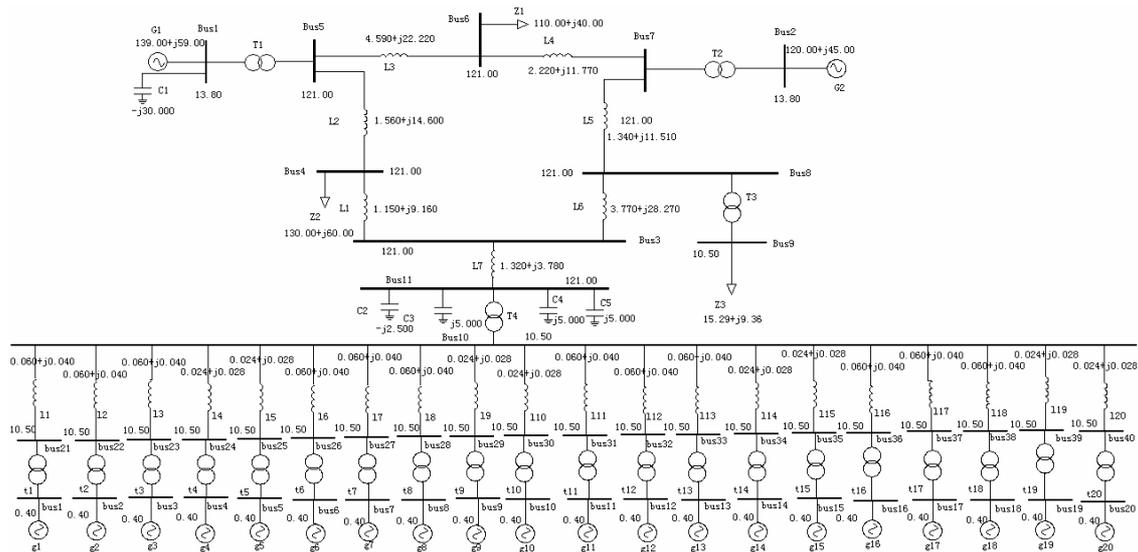


图7 并网光伏电站系统接线图

Fig. 7 System wiring diagram of grid-connected photovoltaic power station

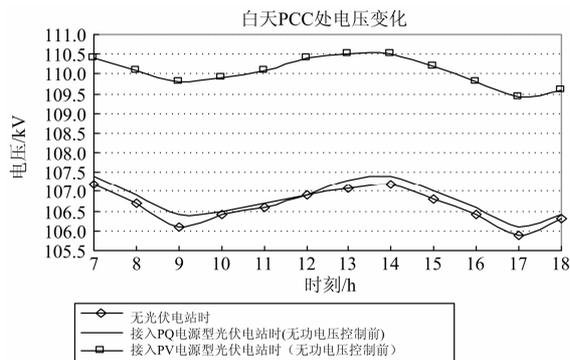


图8 光伏电站接入前后 PCC 电压变化曲线

Fig. 8 Voltage curve at the PCC before and after photovoltaic power station connected to the grid

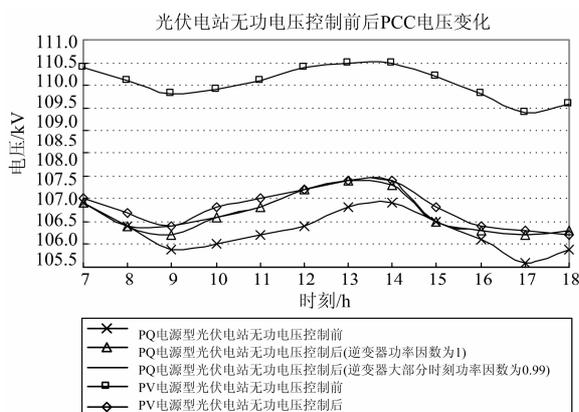


图9 光伏电站无功电压控制前后 PCC 电压变化曲线

Fig. 9 Voltage curve at the PCC before and after reactive power and voltage control of photovoltaic power station

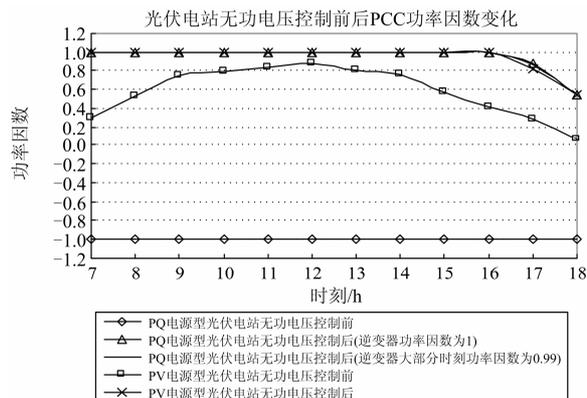


图10 光伏电站无功电压控制前后 PCC 功率因数变化曲线

Fig. 10 Power factor curve at the PCC before and after reactive power and voltage control of photovoltaic power station

从图9可以看出,对于PQ电源型光伏电站,采用无功电压控制策略前,PCC电压在9、10、16、17和18时刻偏低;通过SVG补偿或者降低逆变器功率因数大部分时刻为0.99(17和18时刻除外)进行无功电压控制后,PCC电压在白天时刻均合格。对于PV电源型光伏电站,采用无功电压控制策略前后,白天各时刻PCC电压均在正常范围内,采用无功电压控制策略后由于提高了PCC功率因数导致其电压有明显的下降但均合格。

从图10可以看出,对于PQ电源型光伏电站,采用无功电压控制策略前,PCC功率因数在10、11、12、13和14时刻均为-0.99;进行无功电压控制后,PCC功率因数只有在17和18时刻偏低,其余时刻

功率因数全为 1, 原因为 17 时刻光伏有功出力很小且变电站负荷功率又较大, PCC 电压和功率因数不能同时满足控制目标要求时, 选择降低 PCC 功率因数使其电压满足目标值。图 10 中选择改变逆变器功率因数 (由 1 变为 0.85), PCC 电压值为 106.7 kV。若选择改变 SVG 补偿容量 (容性 3 Mvar), 电压也可变为 106.7 kV。18 时刻由于光伏电站有功出力太小 (1 MW), 功率因数控制没有实际意义。对于 PV 电源型光伏电站, 采用无功电压控制策略前, PCC 功率因数在白天各时刻均较低, 进行无功电压控制后, PCC 功率因数同样只有在 17 和 18 时刻偏低, 其余时刻功率因数均满足 $0.99 \leq \cos \varphi \leq 1$ 。图 10 中选择调节逆变器电压 (全部由 0.4 kV 变为 0.43 kV), 17 时刻电压值为 106.8 kV。若选择减少 SVG 补偿量 (投入 4 组, 每组 4.5 Mvar) 或调节主变分接头 (由 0 档调为 -1 档), 17 时刻电压分别为 106.8 kV 或 106.7 kV 均合格。

4 结论

本文根据 PCC 无功电压控制目标, 针对 PQ 电源型和 PV 电源型光伏电站提出了不同的无功电压控制策略, 搭建了光伏电站有功出力和负荷均变化的动态光伏电站并网仿真模型。算例表明: 1) 光伏电站内部线路、变压器损耗会影响 PCC 处电压和功率因数, 在进行光伏电站无功电压控制分析时不能忽略; 2) 从装置充分利用的角度考虑, SVG、逆变器、主变压器应综合投入使用, 其中优先调节逆变器; 3) 本文所提策略可以控制 PCC 电压合格、功率因数接近 1, 在大型并网光伏电站无功电压控制研究中具有可行性和参考意义。

参考文献

- [1] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.
ZHANG Li-mei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [2] CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, SHI Dong-yuan, et al. Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 26(3): 516-523.
- [3] ACHARYA N, MAHAT P, MITHULANANTHA N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(2): 669-678.
- [4] 裴玮, 盛鸥, 孔力, 等. 分布式电源对配电网供电电压质量的影响和改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.
- [5] 国家电网公司. Q/GDW 617-2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京: 国家电网公司办公厅, 2011.
State Grid Corporation of China. Q/GDW 617-2011 technical rule for photovoltaic power station connected to power grid[S]. Beijing: General Office of State Grid Corporation of China, 2011.
- [6] WANG Yi-bo, WU Chun-sheng, LIAO Hua, et al. Study on impacts of large-scale photovoltaic power station on power grid voltage profile[C] // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, China, 2008: 2575-2579.
- [7] MARINOPOULOS A, PAPANDREA F, REZA M, et al. Grid integration aspects of large solar PV installations: LVRT capability and reactive power/voltage support requirements[C] // Power Tech 2011 IEEE Trondheim, 2011(6): 1-8.
- [8] 陈波, 朱晓东, 朱凌志, 等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 6-12.
CHEN Bo, ZHU Xiao-dong, ZHU Ling-zhi, et al. Strategy for reactive in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 6-12.
- [9] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏电站并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
CHEN Quan, LI Ling-dong, WANG Qun-jing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability

- in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [10] 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.
ZHANG Li, XU Yu-qin, WANG Zeng-ping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.
- [11] 郭康, 徐玉琴, 张丽, 等. 计及光伏电站随机出力的配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 53-58.
GUO Kang, XU Yu-qin, ZHANG Li, et al. Reactive power optimization of distribution network considering PV station random output[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 53-58.
- [12] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-96.
ZHANG Li-mei, TANG Wei, ZHAO Yun-jun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-96.
- [13] 魏世贵, 刘双. AGC/AVC 在光伏电站的应用[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 35-37.
- WEI Shi-gui, LIU Shuang. Application of AGC/AVC in photovoltaic power station[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(2): 35-37.
- [14] 李升. 变电站电压无功控制理论与设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 16-42.
LI Sheng. Voltage and reactive power control theory and design of substation[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 16-42.
- [15] 徐晓艳. 并网光伏电站模型及其运行特性研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
XU Xiao-yan. Research on the model of grid-integration PV station and its operation characteristics[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2009.

收稿日期: 2013-10-15; 修回日期: 2013-11-20

作者简介:

葛 虎 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术研究; E-mail: gehu20082244@163.com

毕 锐 (1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术及能量管理系统;

徐志成 (1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术研究。