

光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究

黄冬冬¹, 吴在军¹, 窦晓波¹, 莫熙¹, 赵波²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了充分发挥并网逆变器结构及功能上的潜在优势, 研究将滤波及无功补偿功能融入光伏电站逆变器中, 同时实现有功并网、谐波抑制、无功补偿及电压补偿等多功能复用。在研究了逆变器控制策略以及微电网电能质量特性和控制方法后, 对光伏电站拓扑结构进行了改进。在此基础上提出了一种基于逆变器动态剩余容量的无功分配策略, 对并联逆变器和串联逆变器的控制策略进行详细讨论。运用该控制策略有效地实现了光伏规模化并网的电能质量复合治理, 并用 PSCAD/EMTDC 软件通过实例仿真验证了控制策略的正确性和有效性。

关键词: 大规模光伏; 电能质量; 并联逆变器; 串联逆变器; 无功分配

A power quality composite control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation

HUANG Dongdong¹, WU Zaijun¹, DOU Xiaobo¹, MO Xi¹, ZHAO Bo²

(1. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To maximize the potential benefits of the structure and function of grid connected inverters and integrate the function of filtering and reactive power compensation into PV power plant inverters, while achieving multi-function reusing, such as active grid, harmonic suppression, reactive power compensation and voltage compensation. After researching the controlling strategies of inverter and power quality characteristics and controlling methods, the topology of PV power plant is improved, based on which the reactive power allocation strategy of dynamic stability margin of inverter is proposed, and the controlling strategy of shunt connected inverter and series connected inverter are researched in detail. The use of the controlling strategy mentioned above effectively implements the power quality complex governance of large-scale grid-connected photovoltaic, and the correctness and effectiveness of the proposed controlling strategy is verified by PSCAD/EMTDC.

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

Key words: large scale photovoltaic; power quality; parallel inverter; series inverter; reactive power allocation

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0107-06

0 引言

随着人们对大规模光伏发电技术的关注, 针对光伏电站并网点电能质量治理的问题日益突出, 大规模光伏并网的电能质量控制技术研究已经成为该领域的研究热点^[1-3]。

针对大规模光伏电站的电能质量治理问题, 文

献[4]提出使用级联型 SVG 及混合型有源滤波器 (Hybrid active power filter, HAPF)的综合治理方案; 文献[5]对两类电能治理装置 SVC 和 SVG 与光伏电站的优化配置及交互影响作了相关研究, 并提出采用 SVG 和光伏联合协同控制的发电系统, 对光伏电站的无功电压波动和谐波电流治理有很好的效果。而对分布式电源并网的电能质量治理问题, 国内外有科研人员提出了无功补偿和光伏并网发电的统一控制方法^[6-8], 在对微电网电能质量指标研究的基础上, 文献[9]提出了集成电流谐波和电压谐波治理功能的分布式电源并网逆变器仿真模型, 提出使用微电网内常见的逆变型分布式电源(Inverter Interfaced

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2011AA05A107); 镇江市科技支撑计划项目 (GY2011019); 国家电网公司项目 (52110113091H, 5211011400AX); 省级电网运行控制协调优化技术与示范

Distributed Generator, IIDG)对微电网电能质量进行补偿和控制,有效改善微电网电能质量。文献[10]提出了一种具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器的结构及控制策略,该系统能同时实现电能质量综合治理、光伏并网发电以及电力中断补偿。但是,目前针对中规模光伏电站的电能质量治理尚且没有较完善的解决方案。而对于光伏电站无功问题研究集中在功率解耦控制和低电压穿越技术上^[11-13],并未对光伏电站逆变器之间的无功功率分配问题作相关研究。

因此,本文针对中规模光伏电站,开展集成电能质量治理功能的光伏规模化并网控制策略的研究,提出了新型光伏电站拓扑结构以及逆变器无功功率分配方法,在此基础上建立集成电流谐波、电压暂降、电压谐波治理和无功补偿等功能的光伏电站并网仿真模型,进行仿真验证。本文提出的策略实现了规模化光伏电站安全、稳定、友好接入配电网,为提高配电网对大型分布式电源的接纳能力提供技术保证。

1 光伏电站电能质量问题

由于储能设备成本较高,在规模化光伏并网处安装大规模储能还不现实,因此光伏并网发电后必然会对配电网安全稳定运行和电能质量问题带来一些特殊的影响^[14]。

如图1所示,光伏电站的输出功率随昼夜和季节的变化呈周期性波动,且受外界条件影响会产生功率突变,因此会造成电压波动和电流谐波问题;光伏逆变器采用电力电子接口,不可避免地给系统带来大量谐波,同时电力电子负载也给配网提供了很大的谐波源;光伏并网通常采用PQ控制模式,若采用MPPT最大功率跟踪不可避免会产生功率随机波动,若不控制无功输出则光伏电站输出功率因数恒定且不能提供必要的无功支撑;本地负载往往是敏感负荷或者工厂负荷,含有电流谐波和电压畸

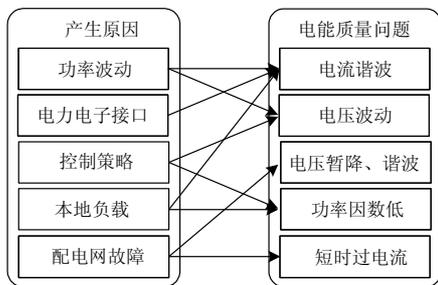


图1 光伏电站的电能质量问题

Fig. 1 Power quality problems of photovoltaic power plant

变量,且功率因数较低;配电网故障造成本地电压暂降或者PCC点短时过电流问题。

光伏电站自身所产生的电能质量问题,以及本地负荷与配电网所带来的电能质量问题交互影响,若不进行适当控制,必会对系统的稳定性造成影响。因此,考虑到光伏电站的结构和控制方法,可以对光伏电站拓扑结构进行改进,能够有效地改善电能质量问题,减少专门的电能质量治理设备的投入,做到最大效率能量输出的同时控制PCC点电能质量符合规定,还能保证本地负荷的供电质量和可靠性。

2 光伏电站拓扑结构设计

中规模光伏电站大都安装在大型工厂或者在工业园区内,规模一般在1MWp到5MWp,负责向厂区供电,同时在PCC处并网在光照较强时将多余电量向配电网输送。本论文设计的光伏电站拓扑结构如图2所示。

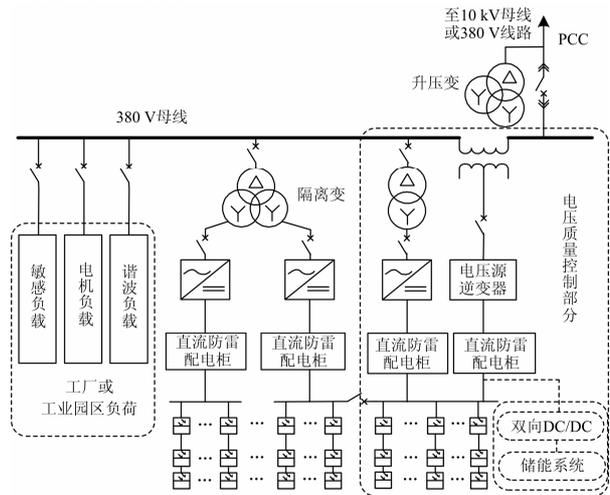


图2 光伏电站拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of PV power plant

光伏阵列串并联后通过直流防雷配电柜汇流,百千瓦逆变器将直流电转换成380V交流电,再通过隔离变压器接入厂区380V电压母线。其中并联逆变器控制为电流源逆变器,可以集中光伏功率输出和谐波无功补偿的功能,保障PCC点的并网电流质量和功率因数,实现负荷的友好接入;串联逆变器控制为电压源逆变器,在公网发生故障时发生电压跌落或由于雷击发生电压短时突增时通过光伏电池输出补偿能保障敏感负载的电压质量。

在光伏汇流直流母线之间设置有断路器,在光照强度较低时可以将一些逆变器退出运行,提高单个逆变器的运行效率。图2中虚线部分为储能系统,加入储能后,此光伏电站还可以拓展为小型微电网

系统, 在 PCC 断开时可以孤岛运行一段时间, 更加提高了敏感负荷的供电可靠性。

光伏电站拓扑中电压质量控制部分如图 3 所示, 副逆变器通过变压器串入 PCC 点, 为避免正常工作时逆变器损耗, 通过控制三个断路器可以让副逆变器在电压出现波动时再接入。

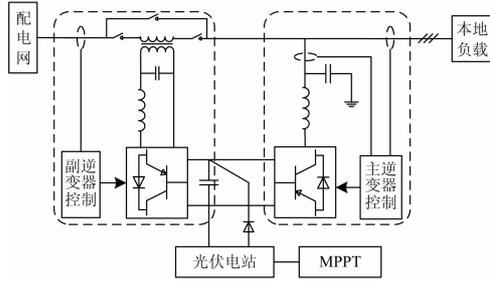


图 3 电压质量控制部分控制结构

Fig. 3 Structure of voltage quality control portion

3 光伏电站控制策略研究

3.1 并联逆变器无功功率分配策略

目前主流的光伏逆变器最大容量为 500 kW, 因此光伏电站由很多逆变器并联而成, 如图 2 所示。光伏逆变器有功输出为 MPPT 最大功率跟踪模式, 无功输出主要有三种控制模式: 负载跟踪模式、指令模式和电压控制模式。由于每个逆变器的容量和实时有功输出都不相同, 对于三种控制模式来说, 无功补偿设定都需要通过事先设定的规则在并联逆变器之间分配, 本文提出了一种基于逆变器动态剩余容量的无功分配策略, 根据逆变器的容量和有功功率分配无功, 如式(1)所示。

$$Q_{ref-i} = \frac{S_{i\max} - P_i}{\sum_{i=1}^n (S_{i\max} - P_i)} Q_{ref} - \alpha_i \frac{dP_i}{dt} \quad (1)$$

式中: Q_{ref-i} 、 $S_{i\max}$ 和 P_i 分别为第 i 个逆变器的给定无功功率值、额定最大容量和实时输出有功功率; Q_{ref} 为无功需求总量; α_i 对应第 i 个逆变器的动态调节系数, 由式(2)给出。

$$\alpha_i = H(S_{i\max}, P_i, t) \quad (2)$$

式中, H 为自定义的函数, 决定了无功分配中动态调节比例, 增加无功调节过程中的系统稳定性。

3.2 集成电流治理功能的并联逆变器并网控制方法

根据谐波检测 i_p - i_q 法可以得到, 三相负载电流 i_a , i_b 和 i_c , 经 C_{32} , C 转换和低通滤波器(LPF)后得到的直流分量是有功基波电流幅值 \bar{i}_p , 因此, 可以利用 \bar{i}_p 来控制有功的输出。

如图 4 所示, 为控制有功输出的谐波检测和指令电流合成原理图, 可以检测光伏电池 MPPT 的输出电压 U_{dc} , 将其与给定直流母线电压 $U_{dc}^* = 800$ V 进行比较, 对直流母线进行无差控制, 可同时实现无功、谐波电流补偿及光伏并网发电。

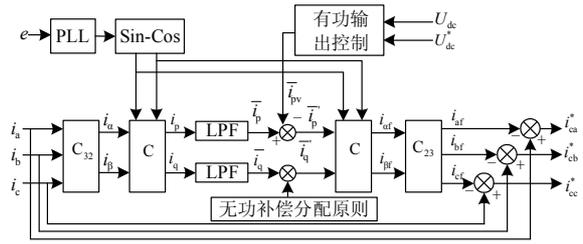


图 4 并联逆变器指令电流合成原理图

Fig. 4 Schematics of parallel inverter current instruction

结合瞬时无功检测原理可以得到此时指令电流的计算公式为

$$\begin{bmatrix} i_{af}^* \\ i_{bf}^* \\ i_{cf}^* \end{bmatrix} = C^{-1} \cdot C_{32}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{i}_p - i_{pv} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p - i_{pv} \\ -\bar{i}_{pv} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} i_a - \sqrt{2/3} \cdot \bar{i}_p \cdot \sin \omega t \\ i_b - \sqrt{2/3} \cdot \bar{i}_p \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c - \sqrt{2/3} \cdot \bar{i}_p \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \bar{i}_{pv} \cdot \sin \omega t \\ \bar{i}_{pv} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \bar{i}_{pv} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

从式(4)可以看到, 输出的指令电流的前一项是瞬时无功功率理论中的无功及谐波电流分量, 而后一项则是包含 \bar{i}_{pv} 指令信息的三相基波电流。

根据得到的参考电流, 以及无功功率分配原则, 本文采用无差拍控制^[15]来实现逆变器的最终输出。图 5 为并联逆变器的控制策略框图。谐波和无功参考电流控制策略分别采用本节的有功谐波统一输出控制方法和动态无功分配策略(DRAP)。为了使逆变

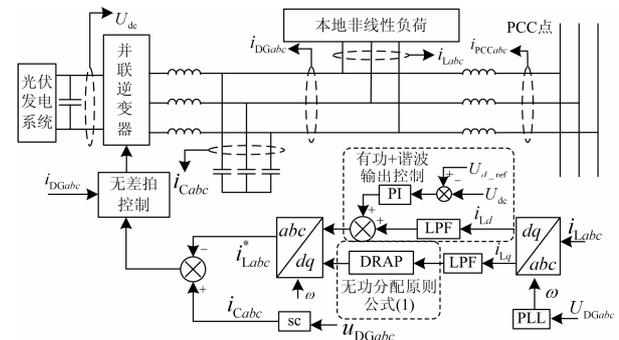


图 5 并联逆变器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of parallel inverter

器能更好地控制输出参考电流，需要在逆变器出口处设置 LC 滤波环节。由于滤波电容的存在，需在式(4)中得到的 DG 参考电流值加上流经滤波电容的电流 i_{Cabc} 。

3.3 集成电压治理功能的串联逆变器控制方法

对串联逆变器的控制策略，本文采用改进电压检测方法^[16]检测 PCC 点电压，克服了以往检测方法中使用滤波器所带来的延时，大大提高了实时性。采用完全电压补偿策略，使得 PCC 点电压恢复到跌落前的幅值和相角。

补偿电压采用双环反馈控制^[16]，补偿电压经串联变压器注入负载和电网之间的 PCC 点，逆变器环节用增益为 K_i 的线性环节代替，变压器环节增益为 K_j ，滤波器滤除高次谐波后，提供负载电压。控制原理框图如图 6 所示。

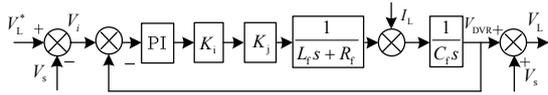


图 6 补偿电压反馈控制框图

Fig. 6 Diagram of compensation voltage feedback control

图中， V_L^* 为负载参考电压， V_L 为负载电压， V_s 为电网中的扰动电压， I_L 为电网中的扰动电流。这样，在参考电压与负载电压之间形成了一个双闭环，增加了电流环提高系统的暂态性能，负载电压能够更好地跟随参考电压变化。

4 仿真分析

本文利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建如图 2 所设计的光伏电站模型，光伏电站的容量配置见表 1，为了简化仿真，本节中规模化光伏电站采用两个并联逆变器和一个串联逆变器，逆变器控制采用上节所提出的无功分配策略和设计的控制方法。

为了验证控制策略的有效性，仿真系统设定在 1 s 时本地负载无功功率由 110 kvar 突增到 185 kvar；在 1.7 s 时并联逆变器 2 的光照由 400 W/m^2 突增到 700 W/m^2 ；在 2.4 s 时并联逆变器 1 的光照由 800 W/m^2 突降到 400 W/m^2 ，假设光伏电池表面温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 不变。在设定条件下并联逆变器输出功率如图 7 所示，逆变器之间的动态无功功率分配能够按照逆变器剩余容量来确定，可以看到无功补偿较有功功率波动有延后，说明式(1)功率分配算法中加入动态调节量后有明显效果，保证了有功波动时逆变器不会超额定容量运行，提高了系统的稳定性。

表 1 典型规模化光伏电站容量配置

Table 1 A typical configuration of the photovoltaic power

功率源	有功/kW	无功/kvar
并联逆变器 1	350(stc)	/
并联逆变器 2	350(stc)	/
串联逆变器	100	/
本地负荷 1	50	23
本地负荷 2	42	16
本地负荷 3	50	23

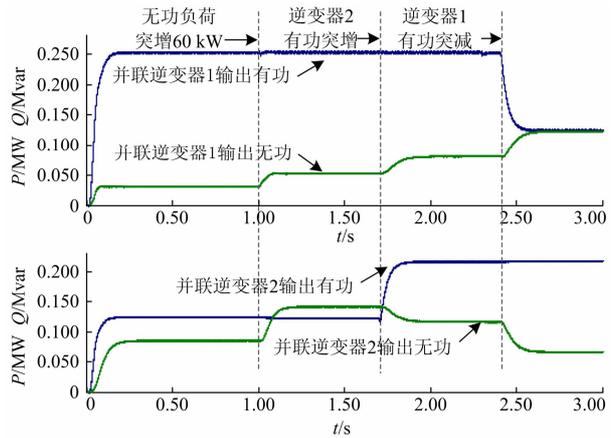


图 7 设定条件下并联逆变器输出功率图

Fig. 7 Power of parallel inverter under the conditions

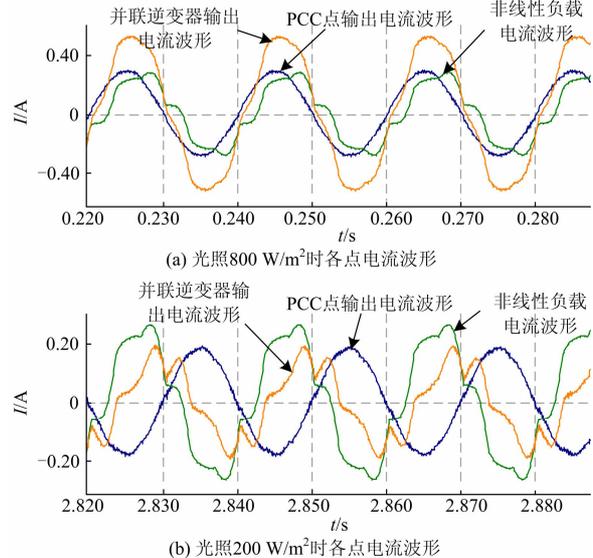


图 8 光伏电站中各点电流波形

Fig. 8 Current of the points in PV field

设定 2 s 时光照强度由 800 W/m^2 突增到 200 W/m^2 ，2 s 前，并联逆变器 1 的输出有功为 250 kW，光伏电站向配电网输送剩余功率，光伏电站电流波形如图 8(a)所示。可以看到，光伏逆变器在补偿谐波负载电流的同时实现有功功率的输出，并且补偿了本地负载的无功电流，使得 PCC 点的功率因数由 0.79

提高到1, 图9为本地负载电流和PCC点电流的频谱分析。

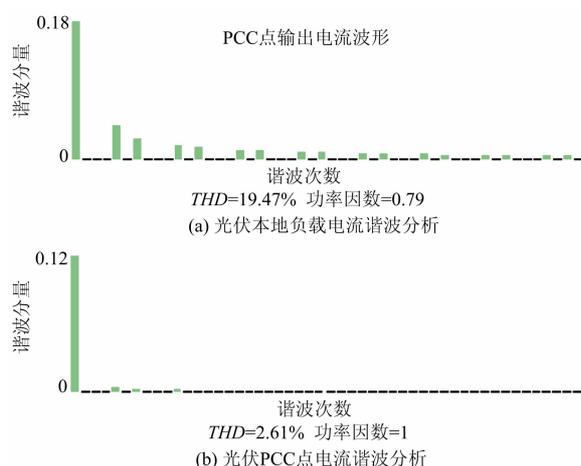


图9 负载与PCC点的电流谐波分析

Fig. 9 Current harmonic analysis of the PCC and the load

2 s后, 当太阳辐照度为 200 W/m^2 时, 光伏电站输出功率不足, 本地负载需要从配电网中吸收功率, 此时光伏并联逆变器同样可以实现有功输出、谐波补偿与无功补偿, 如图8(b)所示。在这两种极端情况下光伏逆变器控制都能保证PCC处流过电流的畸变率小于3%。

需要说明的是, 当PCC点的功率流动较小时, 即光伏电站的输出功率跟本地负荷相差不多时, PCC处的电流畸变率较大, 这是由于基波电流较小引起的, 但是此时PCC处流过的电流很小, 所以不会对配电网电流造成很大的影响。

图10所示为串联逆变器对负载电压的补偿电压波形图。图10(a)为PCC点电压波形, 即配电网电压波形, 正常并网运行时配电网电压畸变率较大, 且在3.602 s时发生单相接地短路, 单相电压暂降到100 V, 3.67 s时故障切除。图10(b)为串联逆变器的输出补偿电压, 图10(c)为负荷端经过补偿后的电压波形。

由图10可以看到, 在电压跌落的瞬间, 串联逆变器动态性能较好, 在5 ms内跟踪到指令电压。关于并联逆变器的损耗问题, 图11给出光伏系统的功率图, MPPT输出功率与光伏逆变器输出功率在电压不发生暂降时相差35 kW, 这主要是由于串联逆变器的损耗引起, 还包括光伏逆变器的损耗和滤波损耗。当配电网发生暂降后, 光伏逆变器输出功率增加, 这部分能量是由串联逆变器从配电网吸收而来。

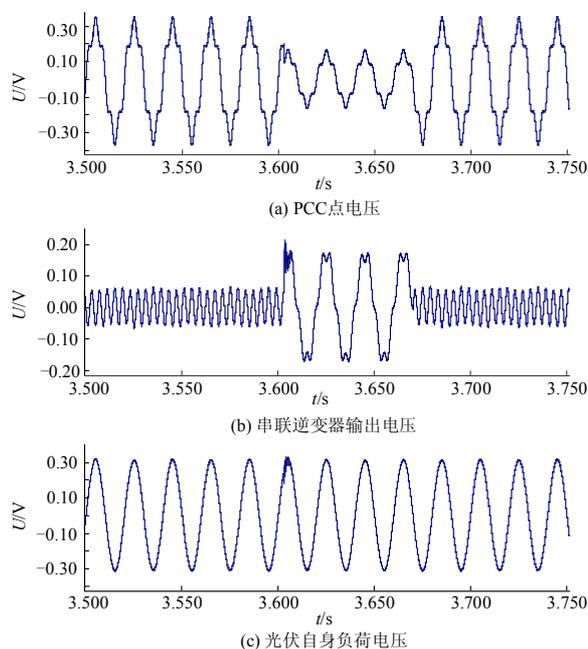


图10 串联逆变器补偿电压波形图

Fig. 10 Compensatory voltage waveform of series inverter

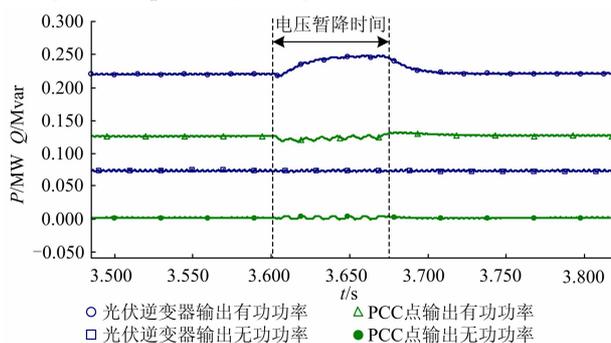


图11 配网电压暂降时光伏电站功率图

Fig. 11 Output power of the PV plant under voltage sags

5 总结与展望

本论文在研究了光伏规模化并网的电能质量问题后, 设计了具有光伏电站电能质量综合控制功能的光伏电站拓扑结构, 提出了一种基于逆变器动态剩余容量的无功分配策略, 并设计了并联逆变器和串联逆变器的控制方法, 在高效利用绿色能源的同时能提高工厂敏感负荷供电的可靠性和提供优质的电能质量, 还可以保证PCC点谐波及无功输出, 使得工厂负荷变成友好负载。最后通过PSCAD/EMTDC仿真分析验证了光伏电站拓扑结构和控制策略的正确性和有效性。

参考文献

- [1] HAN B, BAE B, KIM H, et al. Combined operation of unified power-quality conditioner with distributed

- generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 330-338.
- [2] GUERRERO J M, LOH P C, LEE T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids — part II: power quality, energy storage, and AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1263-1270.
- [3] 杜春水, 张承慧, 刘鑫正, 等. 带有源电力滤波功能的三相光伏并网发电系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 163-169.
DU Chunshui, ZHANG Chenghui, LIU Xinzhen, et al. Control strategy on the three-phase grid-connected photovoltaic generation system with shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 163-169.
- [4] 唐辉. 大型光伏电站电能质量分析与治理方案研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [5] 康珍. 高渗透率下光伏电源并网电能质量问题及其交互影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [6] 周林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.
ZHOU Lin, ZENG Yi, GUO Ke, et al. Development of photovoltaic grid-connected system with power quality regulatory function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 137-145.
- [7] 吴春华, 黄建明, 陈卫民, 等. 单相光伏并网与有源滤波的统一控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 103-109.
WU Chunhua, HUANG Jianming, CHEN Weimin, et al. Unified control of single phase photovoltaic grid-connected and active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 103-109.
- [8] WANG F, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Grid-interfacing converter systems with enhanced voltage quality for microgrid application — concept and implementation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3501-3513.
- [9] 李盛伟, 李永丽, 孙景钉, 等. 基于逆变型分布式电源控制策略的微电网电能质量控制方法[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 6-11.
LI Shengwei, LI Yongli, SUN Jingliao, et al. A power quality control algorithm for micro-grid based on control strategy of inverter interfaced distributed generator[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 6-11.
- [10] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 82-86.
ZHANG Guorong, ZHANG Tieliang, DING Ming, et al. Simulation research on unified power quality conditioner with PV grid connected generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 82-86.
- [11] 张浙波, 刘建政, 梅红明. 两级式三相光伏并网发电系统无功补偿特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊1): 242-246.
ZHANG Zhebo, LIU Jianzheng, MEI Hongming. Study of reactive power compensation characteristics on a three-phase double-stage grid-connected photovoltaic power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 242-246.
- [12] 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 Xiaodong, ZHU Lingzhi, et al. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 6-12.
- [13] 梁海峰, 冯燕闯, 刘子兴, 等. 基于无差拍控制的光伏电站低电压穿越技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 110-115.
LIANG Haifeng, FENG Yanchuang, LIU Zixing, et al. Research on low voltage ride through of photovoltaic plant based on deadbeat control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 110-115.
- [14] 李浙. 微网中光伏发电系统的电能质量分析与控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
LI Xi. Power quality analysis and control of photovoltaic generation system in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [15] 吴在军, 杨雷雷, 胡敏强, 等. 改善微网电能质量的有源电能质量调节器研究[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 67-73.
WU Zaijun, YANG Leilei, HU Minqiang, et al. Research on active power quality conditioner for improving power quality of microgrid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 67-73.
- [16] 房善新. 电压跌落检测方法以及动态电压恢复器控制策略的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
FANG Shanxin. The research of detecting method of voltage sag and the control strategy of dynamic voltage restorer[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010.

收稿日期: 2014-04-27; 修回日期: 2014-06-09

作者简介:

黄冬冬(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电及微电网运行控制; E-mail: hddyy158@126.com

吴在军(1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为变电站自动化、分布式发电与微网、电能质量分析与控制;

窦晓波(1979-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为变电站自动化、分布式发电与微电网。