

大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析

——（一）光伏电站专题

杨德州, 王利平, 张军, 吴兴全

(甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 就大型光伏电站各系统进行了模型化研究, 确立了光伏电池、逆变器、控制系统的数学模型。基于这些模型, 对大型光伏系统光伏电池组输出功率特性, 在复杂电网环境中的输出电压、电流特性进行了理论分析, 并着重分析了光伏电站在系统在故障状态下的各种响应特性和其低电压穿越能力, 以及输出谐波、电压波动等其他电能质量方面的问题。部分实验验证和仿真结果表明所建立的大型光伏电站模型及其并网特性分析具备一定的正确性, 为国家新能源战略提供了一定的理论基础和并网指导。

关键词: 光伏电池; 逆变器; 电压控制; 空间矢量; 最大功率点; 孤岛检测; 谐波; 并网特性; 低电压穿越

Modelling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics

—— (1) photovoltaic plant thematic

YANG De-zhou, WANG Li-ping, ZHANG Jun, WU Xing-quan

(Gansu Electric Power Design Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To analyze the grid-connected characteristics, this paper proposes mathematic models for the sub-systems involved in the photovoltaic plant, including the models of photovoltaic cells, inverters and control system. Based on these models, the output power of the photovoltaic cells, as well as the voltage and current of a complex grid are predicted. Furthermore, investigations focus on the response characteristics and low voltage ride through of photovoltaic plant under the condition of the power system faults, as well as the quality of harmonic output and voltage fluctuation, etc. Comparisons between model predictions and experimental results show that the grid-connected characteristics of the large-scale distributed power supply systems can be described with a reasonable accuracy using the proposed models, and it provides a certain theoretical basis and grid-connected instruction for the national new energy strategy.

Key words: photovoltaic cell; inverters; voltage control; space vector; maximum power point; islanding detection; harmonic; grid-connected characteristics; low voltage ride through

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0104-07

0 引言

在能源和环境问题备受关注的当今, 太阳能作为一种洁净的可再生能源在许多国家得到了迅猛发展^[1]。随着我国各地各个大型光伏基地示范工程的逐步并网, 光伏发电系统的整体建模分析与并网特性研究迫在眉睫。

电力系统电磁暂态和机电暂态分析方法已经相当成熟, 而对诸如风能、太阳能等新能源并网引起的电网特性问题分析尚存在许多不完善的地方。文

献[2-6]着重研究光伏电池组系统及其控制回路特性, 而对并网特性研究较少。目前常用的分析方法把新能源并网看做是一个典型的 PQ 或 PV 节点, 进而研究并网特性, 而对其内部工作原理研究工作较少, 这种方法对新能源并网问题的研究存在缺陷。文献[7]低电压穿越模型并不准确, 大型分布式电源并网在系统侧故障时电压并非垂直下降, 频率或转速应先略微下降, 然后上升; 考虑控制回路作用或变桨距等分布式电源调控手段, 频率或转速应近似折线变化。文献[8]只给出大型分布式电源低电压运

行要求, 并未给出实际工作曲线。

光伏电源是一个典型的离散控制系统, 本文就光伏电站内部工作原理及大型光伏电站并网问题做详细研究, 为电网的合理调度和安全经济运行提供理论依据。

1 大型光伏系统理论分析

1.1 光伏发电系统原理

如图 1 所示, 大型光伏系统主要包括光伏电池系统、直交转化系统、交流并网系统和控制系统、滤波系统五大部分。光伏电池系统利用光伏电池的伏打效应将光能转化为直流电能; 直流电能经直交变换电路转化为并网交流电能; 交流并网系统主要解决光伏电站的并网措施; 控制系统则为光伏电站提供所需的控制信号及保护措施; 滤波系统包括直流滤波环节和交流输出滤波环节, 从硬件上减小直流输入扰动和交流输出谐波。

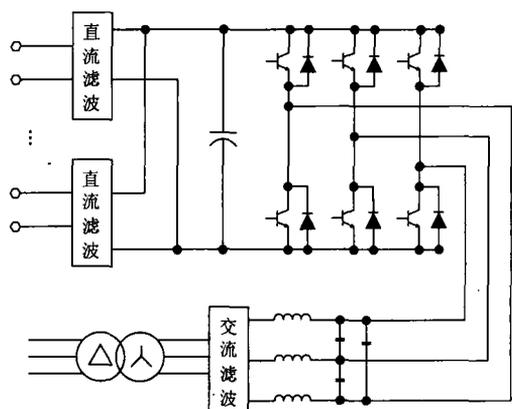


图 1 大型光伏系统原理

Fig.1 Large-scale photovoltaic system principle

1.2 光伏电池数学模型 (表 1)

光伏电池工作原理的基础是半导体 PN 结的光生伏打效应。通过大量的测试及计算可将光伏阵列的数学模型描述如下:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_0 = I_{or} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_{GO}}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_{ph} = [I_{scr} + K_1(T - 298)] \lambda / 1000 \quad (3)$$

$$U_{oc} = U_{ocs} + K_2(T - 298) \quad (4)$$

根据公式 (1) ~ (4) 可知, 温度主要影响太阳能电池的输出电压, 而日照强度主要影响输出电流。在不同日照强度和环境温度下, 其输出特性曲线不同, 且均为非线性。在一定的日照强度和环境温度下, 只有使其工作在特定的电压或电流下才能

使其输出最大功率。但相对于光强的变化来说, 光伏电池表面温度的变化是非常缓慢的, 因此, 在分析过程中, 假定光伏电池的表面温度保持不变。

表 1 光伏电池等效模型参数

Tab.1 Photovoltaic cell equivalent model parameters

I	输出电流	
V	输出电压	
I_d	反向饱和电流	数量级为 10^{-4} A
q	电子电荷	1.6×10^{-19}
k	玻尔兹曼常数	1.38×10^{-23}
T	绝对温度	$t+273$
T_r	参考温度	301.18 K
λ	光照强度	
I_{scr}	标准条件下短路电流	
I_{ph}	光照电流	
E_{GO}	硅的带宽	1.13e
I_0	T_r 下电池饱和电流	
R_s	串联等效电阻	
R_{sh}	并联等效电阻	
A	PN 结理想因子	1.11
K_1	短路电流温度系数	0.0017 A/ $^{\circ}$ C

1.3 电压控制策略

光伏系统并网即逆变器与电网并联运行, 滤波支路容量相对较小, 线路阻抗主要呈现为感性。逆变器输出视在功率为:

$$\begin{aligned} \bar{S} &= P_1 + jQ_1 = \bar{E}\bar{I}^* = \\ &E \left[\frac{E_1 \cos \delta + jE_1 \sin \delta - E}{jX} \right]^* = \quad (5) \\ &\frac{E_1 E}{X} \sin \delta + j \left[\frac{E_1 E \cos \delta - E^2}{X} \right] \end{aligned}$$

其中: X 为逆变器输出阻抗; δ 为逆变器输出电压矢量 \dot{E}_1 与电网电压矢量 \dot{E} 之间的夹角。

逆变器输出有功功率和无功功率为:

$$\begin{cases} P = \frac{E_1 E}{X} \sin \delta \\ Q = \frac{E_1 E \cos \delta - E^2}{X} \end{cases} \quad (6)$$

则逆变器输出有功功率受功角 δ 的影响, 无功功率决定于输出电压幅值 E_1 。因此, 逆变器输出电压的相位与幅值与其输出有功功率和无功功率近似线性耦合。逆变器输出电压幅值可以直接控制, 而相位可以通过调节输出频率来实现; 通过逆变器输

出电压幅值即可达到调节输出无功功率的目的，通过调节频率可以达到输出有功功率的目的。

从直流侧来看，光伏电池阵列工作点处的电压决定了其输出电流，即决定了逆变器输入功率。从交流侧来看，电网可以看成恒压电源，并网功率可由并网电流的大小来体现。

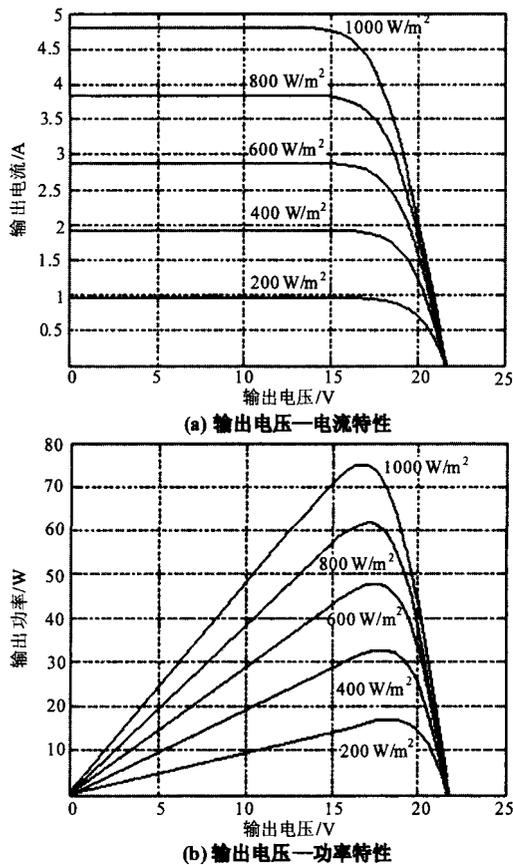


图2 太阳能电池输出特性曲线

Fig.2 Output characteristic curves of PV cell

由光伏电池工作曲线可知，光伏电池的电压决定了光伏电池输出有功功率的大小。故将光伏电池电压调节器的输出作为并网有功功率的给定量。当电网侧需要无功功率时，则检测电网侧所需的无功功率作为并网无功功率的给定量。光伏电池工作在一个预先设定好的矩形区域内。

1.4 空间矢量控制原理

通过 1.3 节分析，大型光伏系统目前多采用有功无功解耦控制，为逆变器空间矢量控制算法提供了基础，逆变器控制脉冲空间矢量算法是为减小注入电网谐波含量，包括正整数次、负序、零序及非整数次谐波（统称为广义谐波）。

空间矢量 PWM 是实现三相功率 6 个功率开关管控制的一种方法，这种方法能够保证三相逆变电流中产生较少的谐波。与正弦调制相比，能够提高

直流电源的利用效率。

a 、 b 、 c 分别代表逆变器 3 个桥臂的开关状态。规定：当上桥臂开关管“开”状态时（此时下桥臂必然是“关”状态），开关状态为 1；当下桥臂开关管“开”状态时（此时上桥臂必然是“关”状态），开关状态为 0。三个桥臂只有“1”或“0”两种状态，因此 a 、 b 、 c 形成 000、001、010、011、100、101、110、111 共八种 (2^3) 开关模式。其中 000 和 111 开关模式使逆变器输出电压为零，所以称这两种开关状态为零状态。

可以推导出，三相逆变器输出的线电压矢量 $[U_{AB} \ U_{BC} \ U_{CA}]^T$ 与开关状态矢量 $[a \ b \ c]^T$ 的关系为：

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = U_{DC} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (9)$$

三相逆变器输出相电压矢量 $[U_A \ U_B \ U_C]^T$ 与开关状态矢量 $[a \ b \ c]^T$ 的关系为：

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{DC} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中， U_{DC} 是直流母线电压。

并网侧实时有功功率和无功功率分别与给定量相比较即对应逆变电路的控制脉冲信号。则根据瞬时无功功率理论，可得逆变器控制信号为：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} \quad (11)$$

1.5 最大功率点跟踪策略

光伏电池输出功率是外界温度、日照强度等因素的非线性函数，在同一外部条件下，光伏电池存在唯一最大功率输出点。为充分发挥光伏电池的效能，实际应用中要使光伏电池始终工作在最大功率点。

MPPT 算法实际上是一个自寻优过程，通过检测光伏电池当前输出电压和电流计算得到当前光伏电池输出功率，再与前一次计算结果相比较，将较大者保存为下次比较对象，从而可以使光伏电池稳定工作在最大功率点上。

光伏电池最大功率控制即光伏电池输出特性如图 3 所示，其中 P 为光伏阵列的输出功率， U 为光伏电池输出电压。令当前计算功率为 P_n ，前一次计算结果为 P_s ，若 $P_n > P_s$ 时，则 $U = U + dU$ ($dU = dU1$ 或 $dU2$)。反之， $U = U - dU$ 。实际算法中，还应加入跟踪误差和光照变化及电网剧烈扰动引起的直流

母线电压波动防护措施。

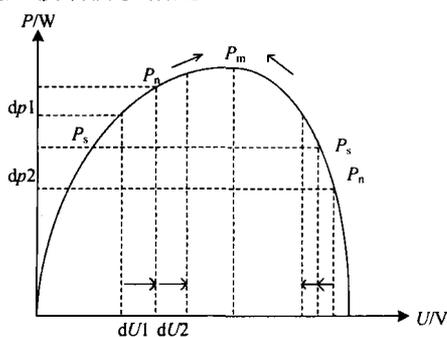


图3 P-U关系曲线图

Fig.3 P-U relation curves

1.6 孤岛检测

主动频率偏移法是通过周期性的改变并网电流频率来实现反孤岛效应功能的。系统逐周期地检测出电网电压的频率后稍微增大或减小固定值以作为并网电流的给定频率,并在电网电压每次过零时使并网电流复位,则当并网时,检测装置每次检测到的电网电压频率不变;而脱网时,并网电流单独作用于负载上,由于并网电流频率的逐周期改变,这样就使得每次检测到的频率也会逐渐增大或减小,很快达到给定频率保护的上、下限值使保护动作。图4为一种主动频率偏移法波形畸变图。

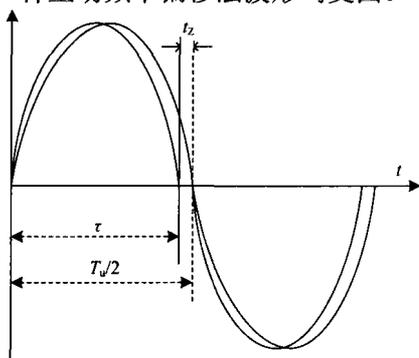


图4 频率偏移法畸变波形

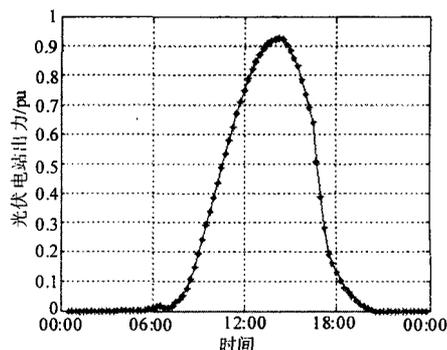
Fig.4 Active frequency drift method distorted waveform

主动频率偏移法对纯阻性负载不存在检测盲区,而RLC并联负载也仅仅在特定的相角区域存在盲区,检测响应时间短。

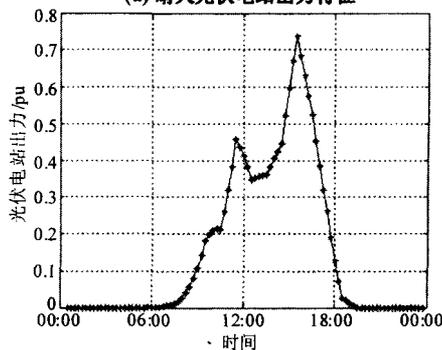
2 光伏电站并网特性研究

2.1 光伏电站出力特性

从图5中可以看出,晴朗天气下敦煌地区光伏电站出力形状类似正弦半波,基本在上午6时至下午20时区间内。当云层遮挡阳光等非理想天气状况下,光伏电站出力减小。



(a) 晴天光伏电站出力特征



(b) 阴天光伏电站出力特征

图5 光伏电站出力特性图

Fig.5 Output characteristic of PV plant

光伏电站因其清洁环保、不消耗常规能源的特性,在公网状况允许的情况下,投运后各级调度系统应保证其按最大出力工况运行,以节省常规能源的消耗,故障等特殊情况下,可以根据实际要求限制出力。

2.2 背景电网分析

考虑光伏系统并网的复杂性,本文选用甘肃酒泉西部地区敦(煌)阿(克塞)肃(北)电网作为分析背景。该地区电网结构较为薄弱,上网小水电、太阳能电站、风电场较多,能比较准确地检验各种电源并网引起的电网稳定问题。本系统中,敦煌光伏示范工程2站,装机容量共20MW,每站装机容量10MW,20台500kWp逆变器,两站打捆接入敦煌110kV变。该地区电网能较准确地检验大型分布式电源并网系统特性。

由于光伏电站只在白天出力,故需分析大方式下潮流特性。由图6可以看出,有功流向为肃北~阿克塞~敦煌~安西,无功流向为瓜州~安西~敦煌~阿克塞~肃北。敦煌光伏示范工程的接入,使当地电网电压升高,进一步加大了当地电网的无功潮流,电网电压和无功调节更加困难,但基本满足电网运行要求。

由于中国地域状况限制,总体状况西电东送,

然而西部电网相对薄弱，西部电网整体无功电压调节能力薄弱，应加快 330 kV 网架建设，同时加快西部电网交流 750 kV 和直流±800 kV 外送型输电系统的建设。

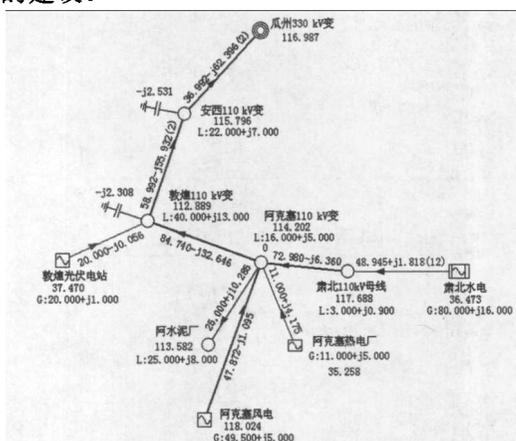


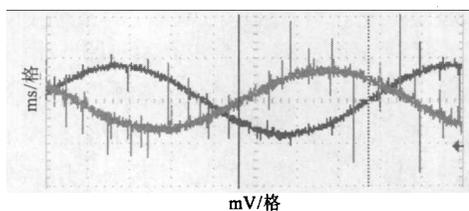
图 6 大方式潮流分布图

Fig.6 Power flow distribution of large mode

2.3 逆变器输出波形

根据电网实际运行要求，光伏电站需有功、无功解耦控制以方便电网调度，从而为逆变电路的空间矢量控制算法奠定基础。根据瞬时无功功率理论建立的光伏电站逆变器空间矢量控制算法，相比普通正弦波调制，可降低光伏电站整体输出电压、电流谐波含量，并提高直流电压利用率，从而提高光伏电站转化效率。

由图 7 可以看出，基于本文理论建立的大型光伏系统逆变器实测输出电压、电流波形接近理想的正弦波。



(纵坐标单位: mV; 横坐标单位: ms)

图 7 逆变器输出电压电流波形图

Fig.7 Output waveforms of voltage and power with inverter

2.4 动态无功补偿

虽然全国各个大型光伏基地已逐步投产，但对单机无功出力特性的研究尚属空白，研究单机无功出力非常具有现实意义。按风电场传统的新型动态无功补偿装置配置方案，将造成巨大浪费，确立最优的无功配置方案必将带来巨大的经济效益。在满足最大输出功率的前提下，合理设置每台逆变器输出功率因数，可以使光伏电站使并网侧功率因数接

近于 1，从而降低光伏电站的无功配置容量。

当电网侧发生瞬时故障时，光伏电站本身不能提供瞬间的电压支撑，容性动态无功补偿装置的装设尤为必要。同时，容性动态无功补偿装置可以显著提高光伏电站各母线电压，增强光伏电站低电压穿越能力。

当由于天气状况变化引起光照发生变化时，光伏电站出力发生变化，从而引起公网接入点电压波动。因此，光伏发电系统同其他分布式电源一样，必须配置相应容量的容性和感性动态无功补偿设备，以抑制公网接入点处母线电压波动。装设动态无功补偿装置后，光照发生变化时引起的各主要节点电压波动最大波动值为 1.30%，未超出规程要求，逆变器输出电压基本恒定。

夜晚光照不足光伏电站退出运行时，公网接入点电压升高，此时需要配置相应容量的感性动态无功补偿设备，以抵消线路的充电功率。装设感性动态无功补偿装置后，光照发生变化时引起的各主要节点电压波动最大波动值为 2.21%，未超出规程要求。

本工程动态无功补偿装置采用 SVC (静止无功补偿器)，动态性能略差，故障时反向冲击电压略大，但满足运行要求。考虑到 STATCOM (SVG) 价格的逐步降低，今后可考虑采用 STATCOM 等新型动态无功补偿设备，以提高光伏电站整体动态响应性能。

通过上述逐机恒功率因数设置，可以使光伏电站总体无功配置容量达到国际通行配置标准，从而在保证系统稳定的前提下配置低于国内目前通行标准的无功配置容量。根据光伏电站内部箱变、电缆、母线及上网架空线路等充电功率确定光伏电站的动态无功补偿容量为 1.8 Mvar。

2.5 低电压穿越

作为分布式电源之一的光伏发电系统，本身无旋转设备，不具备传统电源的机电暂态特性。分布式电源在系统侧故障时不脱网，是分布式电源并网的基本要求。因此，研究光伏发电系统公网侧发生瞬时故障时低电压穿越能力具有非常重要的现实意义。

本工程计算模型中，光伏电站按恒功率因数、动态无功补偿装置未投运时的极端运行工况设置，以检验光伏发电系统的低电压穿越能力。

从图 8 中暂态特性响应曲线可以看出，光伏电站由于其逆变电路及其控制电路的钳制作用，短路电流相比额定电流增加不大。当光伏电站 35 kV 母

线发生三相短路故障时, 逆变器交流输出母线电压降低, 输出电流增大。故障清除后, 交流母线电压迅速恢复稳定, 交流电流、有功功率和无功率在短暂小幅波动后恢复稳定。

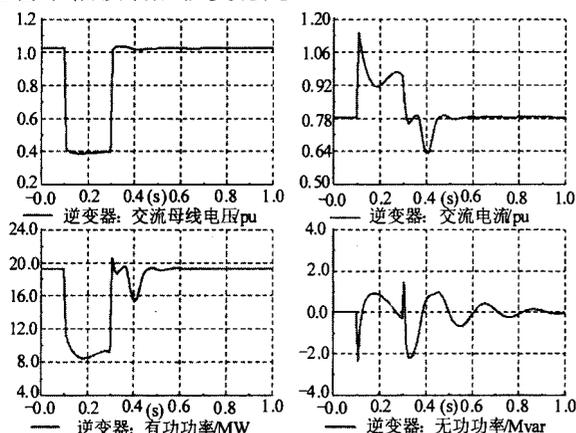


图8 暂态特性曲线

Fig.8 Transient characteristics curves

光伏电站在其出口侧发生三相短路故障时, 逆变器可以在较短的故障区间内以低于额定电压(约 0.4 pu)工况运行, 保证光伏电站整体不脱网; 逆变器输出电流由于其控制策略的钳制作用, 相比其额定电流增加不大(约 1.1 pu)。逆变器整体输出有功功率降低(约 0.4 pu), 符合预先设定的电网故障时光伏电站待机运行状态。虽然光伏逆变器恒功率因数设置, 由于实行有功、无功解耦控制, 且控制回路维持交流输出电压恒定, 因此光伏逆变器输出无功功率仍会瞬时震荡, 逆变器输出电压并非垂直下降。

然而, 光伏电站由于其分布式电源的共性, 并不具备水电厂、火电厂的电磁暂态和机电暂态特性, 不具备调频、调压能力, 逆变器输出电压在系统发生故障后迅速降低, 不能提供瞬间无功电压支撑, 因此光伏电站必须装设动态无功补偿设备。对于大型风电、光伏电压基地, 必须有相应容量的水电厂和火电厂配合才能保证电力系统的安全运行。关于水火电与大型分布式电源的配合问题将在今后单独文献给出。

由以上结果分析可知, 敦煌大型光伏示范工程在并网发生故障时能保持稳定运行, 满足国网公司低电压穿越运行要求。

2.6 光伏电站运行方式

目前, 常见的分布式电源并网系统有恒功率因数型和恒电压型两种运行方式。考虑到恒电压运行方式电网侧发生故障时, 系统无功缺额增大, 分布式电源机端电压降低, 需增加无功出力以维持机端

电压恒定, 分布式电源整体输出视在功率增大, 而分布式电源本身提供无功电压支撑能力有限, 无功出力增大时相位超前, 等效为分布式电源频率增加, 进而引起“交一直—交”或“直—交”变换电路控制算法及分布式电源内部保护算法减小其整体有功、无功出力; 分布式电源整体出力减小后, 系统无功缺额进一步加大, 分布式电源需增加更大无功出力。因此, 恒电压运行模式会引起分布式电源并网“恶性电压崩溃”现象。国内外分布式电源并网事故, 多数属于此种“恶性电压崩溃”造成。关于“恶性电压崩溃”现象将在《大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析——(二)双馈风机专题》中详细说明。

鉴于分布式电源低电压穿越要求与分布式电源本身控制算法间的矛盾, 而分布式电源自身控制算法可以保证机端电压近似恒定, 因此本工程光伏电站采用恒功率因数运行模式。

2.7 公网谐波电压

图9为敦煌20 MW光伏电站谐波电流注入电网后对系统电压的影响特性曲线, 敦煌变35 kV侧电压接近理想的正弦波, 谐波电压含有率为1.68%。

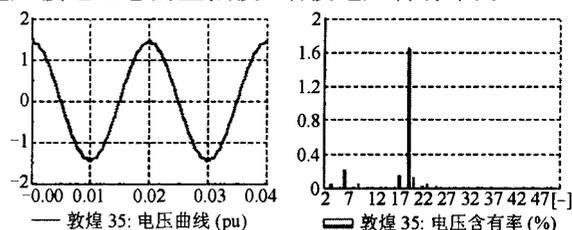


图9 敦煌变35 kV母线电压曲线及谐波分析

Fig.9 35 kV bus voltage curve and harmonic analysis of Dunhuang substation

3 结论

作为大型分布式供电系统, 光伏电源是一个典型的离散控制系统, 本文就光伏电源内部工作原理及大型光伏电站并网问题做详细研究, 包括光伏系统的建模与分析、并网特性相关问题做了详细研究, 该分析同样适用于其他分布式电源。为电网的合理调度和安全经济运行提供理论依据, 对今后全国大型光伏电站的建设具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 孔娟. 太阳能光伏发电系统的研究(硕士学位论文)[D]. 青岛: 青岛大学, 2006.
- [2] 雷元超, 陈春根, 沈骏, 等. 光伏电源最大功率点跟踪控制方法研究[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 76-80.

LEI Yuan-chao, CHEN Chun-gen, SHEN Jun, et al. Research on control method of maximum power point tracking for photovoltaic power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23 (3): 76-80.

[3] 王环, 金新民. 光伏并网逆变器最大功率点的跟踪控制[J]. 电子产品世界, 2004 (4): 88-90.
WANG Huan, JIN Xin-min. The MPPT method for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electronic Engineering & Product World, 2004 (4): 88-90.

[4] 李然, 孙晓, 陈桂兰. 光伏发电系统最大功率点跟踪控制[J]. 电子技术应用, 2001 (8): 33-35.

[5] 李炜, 朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23 (6): 239-243.
LI Wei, ZHU Xin-jian. The maximum power point tracking control of a photovoltaic power system[J]. Computer Simulation, 2006, 23 (6): 239-243.

[6] XIAO Wei-dong, Dunford W D. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems[C]. //2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen(Germany): 2004 : 1957-1963.

[7] 迟永宁, 李群英, 李琰, 等. 大规模风电并网引起的电力系统运行与稳定问题及对策[J]. 电力设备, 2008, 9 (11): 16-19.

CHI Yong-ning, LI Qun-ying, LI Yan, et al. Power system operation and stability problems caused by integration of large scale wind power and corresponding solutions[J]. Electrical Equipment, 2008, 9 (11): 16-19.

[8] 关宏亮, 赵海翔, 王伟胜, 等. 风电机组低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (10): 173-177.
GUAN Hong-liang, ZHAO Hai-xiang, WANG Wei-sheng, et al. LVRT capability of wind turbine generator and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (10): 173-177.

收稿日期: 2009-10-16; 修回日期: 2009-12-09

作者简介:

杨德州 (1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 副总工程师, 研究方向为电力系统一次规划、优质电源供电、无功与谐波抑制等方面的内容;

王利平 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统一次规划、电能质量监控、无功及其谐波抑制与补偿、大型分布式电源并网特性等方面; E-mail: leepingwang@tom.com

张军 (1976-), 男, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为电力系统一次规划、电能质量监控、新能源并网特性等方面。

(上接第 103 页 continued from page 103)

参考文献

[1] 薛巍, 舒继武, 等. 电力系统潮流并行算法的研究进展[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42 (9): 1192-1195.
XUE Wei, SHU Ji-wu, et al. Advance of parallel algorithms for power flow simulation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42 (9): 1192-1195.

[2] 吉兴全, 王成山, 等. 电力系统并行计算方法比较研究[J]. 电网技术, 2003, 27 (4): 22-26.
JI Xing-quan, WANG Cheng-shan, et al. A comparative study on parallel processing applied power system[J]. Power System Technology, 2003, 27 (4): 22-26.

[3] 张浩, 李利军, 等. GPU 的通用计算应用研究[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33 (12): 60-62.
ZHANG Hao, LI Li-jun, et al. General-purpose computation on graphics processors[J]. Computer &

Digital Engineering, 2005, 33 (12): 60-62.

[4] 钱悦. 图形处理器 CUDA 编程模型的应用研究[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36 (12): 177-180.
QIAN Yue. Compute unified device architecture on graphics processors[J]. Computer & Digital Engineering, 2008, 36 (12): 177-180.

[5] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

收稿日期: 2009-08-03; 修回日期: 2009-12-24

作者简介:

夏俊峰 (1979-), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向为电力系统检测与控制、电力系统测控技术; E-mail: jstormx@yeah.net

杨帆 (1982-), 男, 博士生, 研究方向为电力系统运行与控制;

李静 (1979-), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制。