

大型光伏发电系统控制原理与并网特性研究

王利平, 杨德洲, 张 军
(甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对大型分布式电源并网特性研究的空白, 就大型光伏电站内部各系统建模并分析, 确立其数学模型, 包括光伏电池函数、逆变器函数及控制系统函数, 从而进一步分析其并网特性。研究了大型光伏系统在复杂电网环境中的输出电压、电流特性, 故障状态下的低电压穿越能力, 以及其他电能质量方面的问题。理论分析和实验结果证明了大型光伏电站满足电压波动、输出谐波等稳态特性和故障时动态无功补偿、低电压穿越能力、电压稳定等暂态特性要求。

关键词: 光伏电池; 逆变器; 电压控制; 并网特性; 低电压穿越

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1000-100X(2010)06-0061-03

Study of Large-scale PV Power System Control Principle and Grid-connected Characteristics

WANG Li-ping, YANG De-zhou, ZHANG Jun

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

Abstract: Viewing the gap of studies with large-scale distributed power grid-connected characteristics, internal systems of large-scale photovoltaic plant are modeled and analyzed. Mathematical models including photovoltaic cells, inverters, control system functions are established, its grid-connected characteristics are studied further. Output characteristics of voltage, current, low voltage ride through and other power quality problems of large-scale photovoltaic system are studied emphatically in complicated grid. Theoretical analysis and experimental results prove that large-scale photovoltaic plant meets the steady state characteristics of voltage fluctuation, harmonic output, and reach the requirement of transient operation characteristics, dynamic reactive power compensation, low voltage ride through, voltage stability etc. when power grid faults happen.

Keywords: photovoltaic cell; inverter; voltage control; grid-connected characteristics; low voltage ride through

1 前言

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很多国家得到了迅速发展^[1-3]。随着我国各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^[4-6]。电力系统电磁暂态和机电暂态分析方法已相当成熟, 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有许多不完善的地方。目前常用的分析方法把新能源并网看作是一个典型的 PQ 或 PV 节点, 进而研究并网特性, 而对其内部工作原理研究较少。

光伏电源是典型的离散控制系统。在此研究了光伏电源内部工作原理及大型光伏电站并网问题, 为电网的合理调度和安全经济运行提供理论依据。

2 理论分析

2.1 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、DC/AC 转化系统、交流并网系统和控制系统、滤波系统五部分。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 DC/AC 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, 从硬件上减小了直流输入扰动和交流输出谐波。

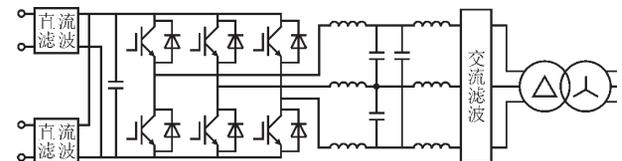


图 1 大型光伏系统发电原理

2.2 光伏电池数学模型

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为:

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \\ I_o = I_{or} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_{G0}}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \\ I_{ph} = \frac{[I_{scr} + K_1(T - 298)]\lambda}{1000}, U_{oc} = U_{ocs} + K_T(T - 298) \end{cases} \quad (1)$$

式中: I 为输出电流; U 为输出电压; q 为电子电荷; k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$; T 为绝对温度, $T = t + 273$; T_r 为参考温度, $T_r = 301.18 \text{ K}$; λ 为光照强度; I_{scr} 为标准条件下短路电流; I_{ph} 为光照电流; E_{G0} 为硅的带宽, $E_{G0} = 1.13 \text{ eV}$; I_o 为 T_r 下电池饱和

定稿日期: 2009-11-25

作者简介: 王利平(1980-), 男, 河北阳原人, 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等。

电流; R_s 为串联等效电阻; R_{sh} 为并联等效电阻; A 为 PN 结理想因子, $A=1.11$; K_1 为短路电流温度系数, $K_1=0.0017 A/^\circ C$ 。

根据式(1)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输出最大功率。但对于光强的变化而言, 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。

2.3 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, 线路阻抗主要呈感性。逆变器输出视在功率为:

$$S = P_1 + jQ_1 = EI^* = E \left(\frac{E_1 \cos \delta + jE_1 \sin \delta - E}{jX} \right)^* = \frac{E_1 E}{X} \sin \delta + j \frac{E_1 E \cos \delta - E^2}{X} \quad (2)$$

式中: X 为逆变器输出阻抗; δ 为逆变器输出电压矢量 E_1 与电网电压矢量 E 之间的夹角。

逆变器输出的有功功率和无功功率为:

$$P = \frac{E_1 E}{X} \sin \delta, \quad Q = \frac{E_1 E \cos \delta - E^2}{X} \quad (3)$$

可见 P 受功角 δ 的影响, Q 取决于输出电压幅值 E_1 。因此, 逆变器输出电压的相位和幅值与其输出有功功率和无功功率近似线性耦合。 E_1 可直接控制, 而相位可以通过调节输出频率来实现; 通过调节 E_1 即可达到调节 Q 的目的, 通过调节频率可达到调节 P 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, 电网可看作恒压电源, 并网功率可由并网电流的大小来体现。图 2 示出输出特性曲线。

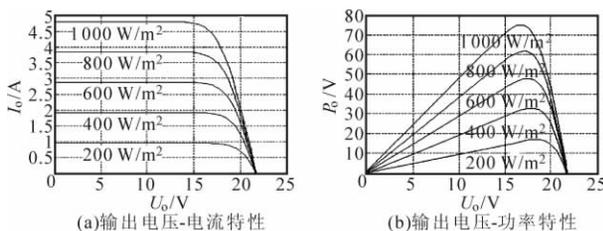


图 2 太阳能电池输出特性曲线

由图可见, 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。

2.4 空间矢量控制原理

由上述分析可知, 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)。

SVPWM 是实现三相功率 6 个功率开关管控制的一种方法。该方法能保证三相逆变电流中产生较少的谐波, 与正弦调制相比, 能提高电源利用效率。

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; 反之, 开关状态为 0。因此 a, b, c 形成 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 共 8 种开关模式。其中 000 和 111 开关模式使逆变器输出电压为零, 故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与开关状态矢量的关系为:

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: U_{dc} 为直流母线电压。

三相逆变器的输出相电压矢量与开关状态矢量的关系为:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (5)$$

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:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.5 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, P, U 为光伏阵列的输出功率和输出电压。

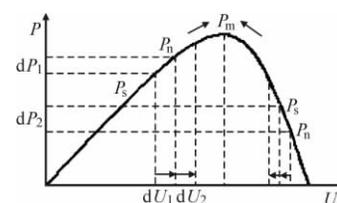


图 3 P-U 关系曲线图

令当前计算功率为 P_n , 前一次计算结果为 P_{n-1} , 若

$P_n > P_s$, 则 $U = U + dU$ ($dU = dU_1$ 或 dU_2); 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。

2.6 孤岛检测

主动频率偏移法是通过周期性地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。

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。

3 并网特性

3.1 背景电网分析

考虑光伏系统并网的复杂性, 选用甘肃酒泉西部地区敦阿肃电网作为分析背景。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。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。

3.2 低电压穿越能力

在满足最大输出功率的前提下, 合理设置每台逆变器的输出功率因数, 可使光伏电站并网侧功率因数接近 1, 从而降低光伏电站的无功配置容量。

光伏电站由于其逆变电路及控制电路的钳制作用, 短路电流相比额定电流增加不大, 当电网扰动时, 不能提供瞬间的电压支撑, 无功补偿装置的装设尤为必要。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。图 4 示出暂态特性曲线。

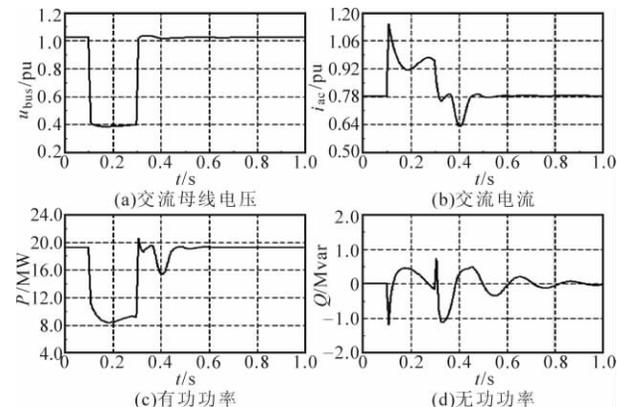


图 4 暂态特性曲线

由图 4 可见, 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约 0.4 pu, 输出电流增大约 1.1 pu。故障清除后, 交流母线电压迅速恢复稳定, 交流电流、有功功率和无功功率在短暂小幅波动后恢复稳定。由以上结果可知, 敦煌大型光伏示范工程选用逆变设备在发生故障时能保持稳定, 且满足低电压穿越要求。

3.3 谐波电压分析

图 5 为敦煌 20 MW_p 光伏电站谐波电流注入电网后对系统电压的影响曲线, 敦煌变 35 kV 侧电压接近理想的正弦波, 谐波电压含有率约为 1.68%。

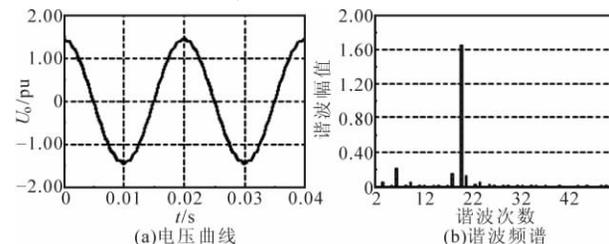


图 5 敦煌变 35 kV 母线电压曲线及谐波分析

3.4 其他问题综述

光伏电站出力的变化引起电网主要节点的电压变化不超过 1.3%, 未超出相关标准的规定。

通过合理设计单机功率因数后, 根据光伏电站内部箱变、电缆、架空线、母线等充电功率确定光伏电站的动态无功补偿容量为 1.8 Mvar。光照变化引起的光伏电站出力变化符合相关规定。

4 结论

光伏电源是一个典型的离散控制系统。就光伏电源内部工作原理及大型光伏电站并网问题进行了详细研究, 包括光伏系统的建模与分析、并网特性相关问题等, 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[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.
- [3] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 王兆安, 黄 俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [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.
- [6] Weidong Xiao, William G Dunford. A modified Adaptive Hill Climbing MPPT Method for Photovoltaic Power Systems[A]. 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference[C]. Aachen Germany, 2004: 1957-1963.