

基于 RTDS 的光伏并网系统防孤岛保护装置试验研究

光伏发电是采用太阳电池组件将光能转换成电能发电方式。在实时数字仿真系统 (Real Time Digital Simulation, RTDS) 上建立了光伏发电系统的等值仿真模型, 主电路采用直流 - 直流 (DC - DC)、直流 - 交流 (DC - AC) 组成的两级式光伏并网发电结构。通过调节 DC - DC 电路的占空比来实现光伏电池阵列的最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制, 并网工作时, 提出了定电压/定无功 (V/Q) 控制策略, 成功实现了逆变器的并网控制。通过光伏电站防孤岛保护装置的 RTDS 闭环试验, 验证了仿真模型的正确性, 能够应用于该类装置的试验验证。

周 宁/国网江西省电力科学研究院

杨 佳 付 磊 于跃海/国网电力科学研究院



周 宁/高级工程师

关键词/Keywords

RTDS ·
 V/Q 光伏并网控制 ·
闭环试验 ·
防孤岛保护装置 ·

随着电力需求的不断增长, 全球能源供应的日益紧张, 太阳能的利用正受到越来越多的重视, 分布式发电中广泛利用太阳能, 既可以减少传统能源的消耗, 又可以减少环境污染^[1-3]。

RTDS 是准确的实时仿真系统^[4], 可以为外部设备提供良好的测试环境。在 RTDS 仿真平台上建立两级式光伏并网发电系统, 对光伏并网发电系统的研究具有重要的现实意义。并网逆变器作为光伏发电设备与电网的接口设备, 对其的控制是并网发电系统的核心。常规的 PI 控制器易于实现, 但对正弦波的参考量却难以消除稳态误差。本文提出了 V/Q 控制模式实现逆变器的并网控制, 不需要采用复杂的锁相环控制技术, 在保证逆变器直流侧电流恒定的情况下, 调节直流母线电压, 并控制网侧无功为恒定值 0, 保证了逆变器功率因数为 1 的并网运行要求。光伏阵列的 MPPT 控制也是本文控制系统的一部

分, 采用恒定电压跟踪法快速跟踪最大功率点 (Maximum Power Point, MPP), 通过大电感与逆变器直流侧相连, 从而保证了逆变器输入的直流电流平滑。仿真结果表明, 系统结构合理, 控制系统性能优良。通过光伏电站防孤岛保护装置试验, 验证了该光伏并网仿真系统能够应用于大型光伏电站并网仿真研究及各类装置的闭环试验。

光伏发电系统主拓扑

光伏并网系统通常由三部分构成: 光伏阵列、光伏逆变器和电网。光伏并网拓扑结构如图 1 所示。其中, 光伏阵列由若干个光伏组件组成, 光伏阵列输出功率为组成的光伏组件串并联等效功率。光伏并网逆变器是将光伏电池所输出的直流电转换成符合电网要求的交流电再输入电网的设备, 是并网型光伏系统能量转换与控制的核心。光伏并网逆变器其性能不仅影响整个光伏并网系统是否能够稳定、安全、可靠和高效的运行, 同时也是影响整个系统使用寿命的主要因素。

如图 1 所示, 并网拓扑结构为两级变换的光伏并网逆变系统, 其前级 DC - DC 变换器和后级 DC - AC 变换器之间一般设置一个足够容量的直流储能电容器, 一般可选择在 $10 \sim 100\ 000\ \mu\text{F}$ 之间, 该直流储能电容在缓冲前、后级能量变化的同时, 也起到了前、后级控制的解耦作用。因此, 对前、后级变换器的控制策略一般可以独立进行研究。两级式光伏并网发电系统相对单级式光伏并网系统具有以下特点: 光伏阵列的 MPPT 控制与逆变器的并网

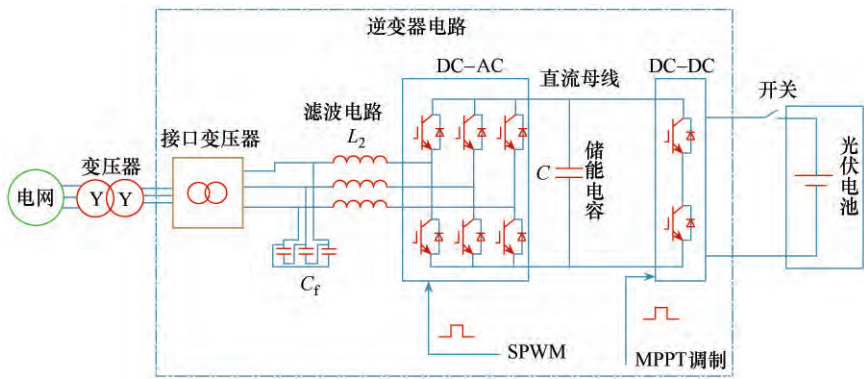


图1 光伏并网系统拓扑图

控制是单独进行控制的，控制效果明显提高，可保证直流母线电压可控，实现了并网运行安全；由于两级式光伏并网系统多了一个DC-DC环节，因此转换效率上相对单级式略有下降。

在RTDS/RSCAD上建立仿真模型时，由于开关管频率较高，一般从几千赫兹到几万赫兹，开关元件采用元件库中的小步长元件，而光伏阵列与负荷采用元件库中的大步长元件建模，这就需要采用元件接口技术。本文中的直流侧光伏阵列与DC-DC变换电路采用双受控源接口技术进行连接，而三相交流侧采用接口变压器与负荷连接。在逆变器 V/Q 控制方式下，作出假定：一是光伏阵列处于标准测试条件（Standard Test Conditions, STC）下工作，STC是指外界温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的输入条件。

控制电路设计

图1中的储能电容 C 将DC-DC变换电路与DC-AC变换电路分成两个部分，二者的控制设计可以单独进行。第一部分DC-DC变换器主要实现光伏电池阵列MPPT控制；第二部分DC-AC变换器采用 V/Q 控制方式，实现逆变器输出电压与频率稳定，该部分有两个基本控制目标：一是要保持前端直流电压稳定；二是要实现并网电流控制，甚至需根据指令进行电网的无功功率调节^[7,8]。

1. DC-DC变换电路控制器设计（光伏电池阵列MPPT控制）

为了提高太阳能利用效率，在STC下，应使光伏电池阵列尽量工作在MPP处，这是光伏电池

运行的基本要求，因而要对光伏阵列进行MPPT控制^[9]。控制框图如图2所示。

图中， U_{pv} 为光伏阵列端电压值； V_{ref} 为光伏阵列端电压给定值。采用DC-DC电路来实现光伏电池阵列MPPT控制是一种最常用的控制方式，它利用PI调节器来对开关管占空比 D 值

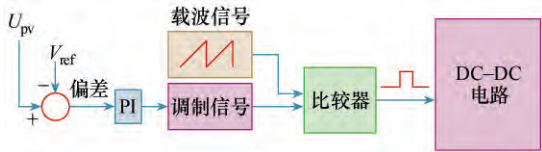


图2 光伏阵列MPPT控制框图

进行控制，设置合理的PI控制参数，光伏阵列端电压采样信号与电压基准值比较，误差经过PI调节器后，得到调制信号，此信号即为DC-DC电路开关管占空比，载波信号幅值设为 $0\sim 1$ ，规定调制信号大于或等于载波信号时，开关管导通，反之则关闭，这样就保证了调制信号幅值就是开关管占空比 D 值。仿真系统中所用的载波发生器和比较器均采用RSCAD提供的小步长模型。PI调节能够实现外电路等效电阻的自动寻优，最终使光伏阵列端电压稳定在给定值附近。在光伏阵列功率突变的要求下，可以改变参考电压值，实现功率调整，在STC下，恒定电压跟踪法应用简便。

2. DC-AC变换电路控制器设计^[10]

光伏发电并网运行时的单相电路原理如图3所示，电网被认为是容量无穷大的电压源， U_G 、 i_G 和 Z_G 分别为电网电压、电流和阻抗，逆变器等效成电流源，输出电流为 i_o ，等效负载上的电压、电流和阻抗分别为 U_L 、 i_L 和 Z_L 。

由于直流母线侧接有大电感，电流平滑，设为 I_0 ，控制直流母线电压 V ，相当于控制逆变器输入有功功率 P ，即

$$P = UI \tag{1}$$

由图3可以得出

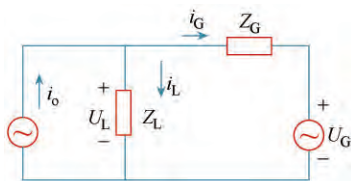


图3 单相并网等效电路图

$$U_G = U_L + Z_G i_G \quad (2)$$

由于电网线路阻抗 Z_G 非常小, 可得出

$$U_G = U_L \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出, 逆变器输出电压由电网电压决定。逆变器输出的有功功率 P 与无功功率 Q 还可表示为

$$P = U_G I_0 \cos(\angle U_G - \angle I_0) \quad (4)$$

$$Q = U_G I_0 \sin(\angle U_G - \angle I_0) \quad (5)$$

为了向电网输入优质电能, 逆变器输出的功率中尽量减少无功功率, 使功率因数接近为 1, 即要求 $Q = 0$ 。由于 P 注入电网为正, 根据式 (4)、式 (5) 可以得出 $\angle U_G = \angle I_0$, 达到了同相位的目的。

根据上述分析, 控制无功功率 $Q = 0$, 就可以使网侧功率因数为 1。

本文采用的 V/Q 控制方式、正弦脉冲宽度调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) 原理, 很好地实现了网侧功率因数的控制, 并保证了并网波形质量。 V/Q 控制框图如图 4 所示。

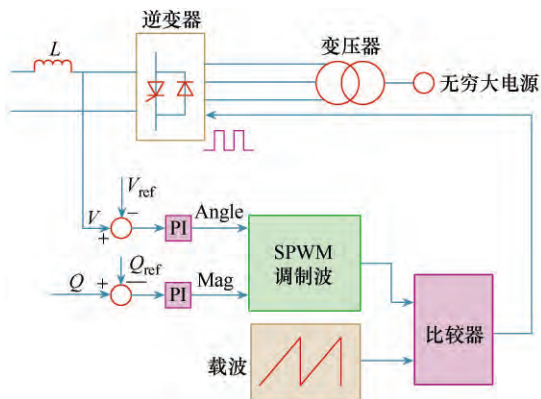


图4 V/Q 控制电路框图

图中, V 为直流母线电压; V_{ref} 为直流母线电压给定值; Q 为向电网输送的无功功率; Q_{ref} 为无功给定值; Angle 为正弦调制波相位, rad; Mag 为正弦调制波幅值; 载波频率为 3 kHz, 幅值范围为 1, 双极性调制。SPWM 调制波频率采用电网

频率 f , 保证了并网波形与电网同频的要求。

采用逆变器前端直流电压控制调制波相位, 利用 PI 调节器进行调节, 可以迅速使直流电压稳定在设定电压值附近, 此过程为有功功率闭环控制; 采用网侧无功功率进行 PI 控制, 用来控制调制波幅值, 两者相互作用产生的正弦调节信号与载波比较, 得到相应的脉冲波, 控制各开关管的开通与关断, 实现对系统的调节, 形成闭环控制, 可以实现系统无功功率的调节, 当无功功率设定值为 0 时, 系统功率因数为 1。该方法控制简单, 没有采用空间矢量控制等复杂的锁相技术, 不需要经过 $abc/\alpha\beta/dq$ 坐标变换, 用 RTDS 仿真建模较容易实现。

光伏电站防孤岛保护装置试验验证

根据上述论述, 在 RTDS/RSCAD 上建立光伏电站防孤岛保护仿真模型, 如图 5 所示。

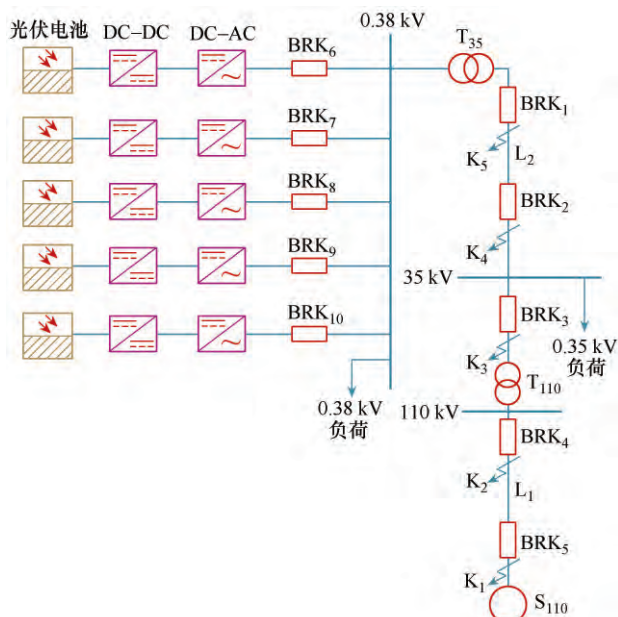


图5 光伏电站防孤岛保护装置试验模型

图中, DC - DC、DC - AC 表示直流 - 直流、直流 - 交流两级变换; L_1 为 110 kV 线路, L_2 为 35 kV 线路; T_{35} 、 T_{110} 均为变压器; S_{110} 表示 110 kV 大电网系统; $K_1 \sim K_5$ 表示故障点; $BRK_1 \sim BRK_{10}$ 表示断路器。其中, BRK_1 为光伏系统并网开关, 该光伏电站等效成五个相同容量的光伏发电模型, 每个光伏阵列串联模块数 $N_s = 200$, 并联的模块数 $N_p = 100$, 每个模块中电池个数 $N_c = 36$ 。在

STC 下, 单个模块的开路电压值为 $V_{oc} = 21.7\text{ V}$, 光伏发电的理论计算 MPPT 处输出直流电压约为 3.4 kV , 此值作为 PI 调节器的参考电压值 V_{ref} 。每个等效光伏阵列在 STC 下的最大功率约为 1 MW 。电网通过接口变压器与 LC 滤波电路相连, 其中, 滤波电容器为 Δ 联结, 接口变压器型号为 Yd11 型。系统中主要参数如下表所示。

表 光伏系统主要参数

参 数	数 值
直流电容 $C/\mu\text{F}$	80 e^3
DC - DC 电路中电感 L/H	0.01
交流滤波电感 L_2/H	0.000 5
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	10
大小步长接口变压器电压比/ V	380/380

图 5 所示的光伏电池模块, 均采用本文提出的模型搭建, 该控制模型中 DC - DC 电路 PI 调节器参数设定为: 比例系数 $K_p = 0.5$, 积分系数 $K_i = 10$; DC - AC 电路中比例系数 $K_p = 0.2$, 积分系数 $K_i = 10$ 。单个光伏模块的仿真波形如图 6 所示。

图 6 中, V_{PV} 为光伏阵列端电压实际值; I_{CAP} 为光伏阵列端电流实际值; P_{PV} 为光伏阵列输出功率实际值; P_{ML} 为输入电网有功功率实际值, Q_{ML} 为输入电网无功功率实际值。 N_A 、 N_B 和 N_C 为光伏模块 380 V 母线并网点电压, I_{BRKA} 、 I_{BRKB} 和 I_{BRKC} 为每个光伏模块的并网处电流。三相电流的总谐波含量 (考虑前七次谐波) 分别为 0.54% 、 0.49% 和 0.53% , 谐波含量很小。因此, 上述的光伏建模方法输出功率稳定, 可以用于大型光伏电站仿真工程应用。

试验将光伏电站防孤岛保护装置接入光伏新能源场站逆变器侧 (380 V 母线电压)、并网点 (35 kV 升压变线路出口) 的三相电压及系统中开关 $BRK_1 \sim BRK_5$ 位置信号。防孤岛保护装置切并网开关 BRK_1 的动作信号分别接入录波器及仿真系统。

根据光伏电站防孤岛保护装置判断逻辑, 在 $K_1 \sim K_5$ 点发生无故障跳、两相相间、两相接地及

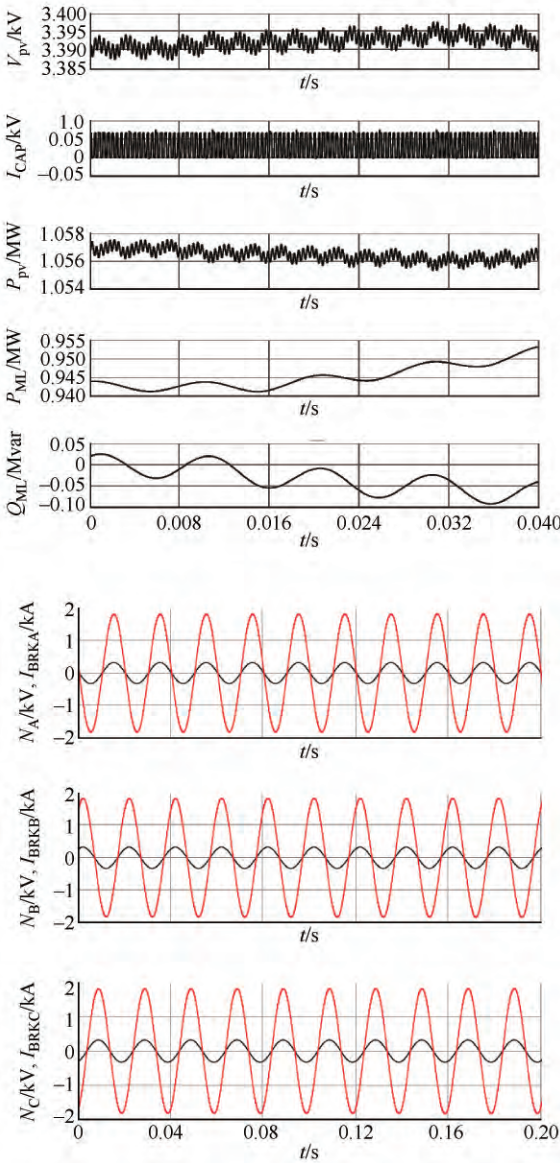


图 6 单个光伏阵列端电压、电流和功率仿真波形

三相故障时, 均会切除并网开关。图 7 为 110 kV 线路近端 K_2 点 ABG 试验录波波形。

图中, $1 - T - BRK_1$ 为孤岛检测装置 BRK_1 动作信号。当 K_2 发生故障时, 孤岛检测装置检测到 35 kV 母线和 380 V 母线相应相别的电压下降, 经过 300 ms 延时后发出并网开关跳闸指令。所模拟的光伏电站并网电压能够在不同运行工况下输出理想的电压波形。被试装置在光伏并网的环境下可靠运行, 装置动作行为与理论判据一致, 同时也验证了在 RTDS 上所建立的光伏并网仿真模型能够适用于光伏并网装置试验。

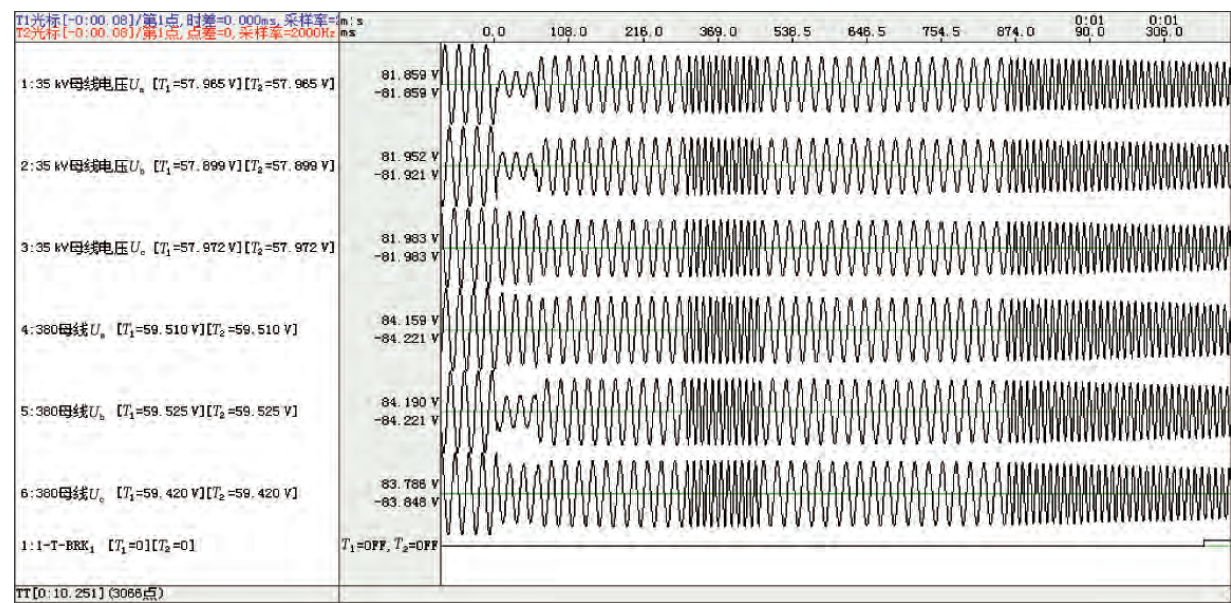


图7 110 kV 线路近端 K₂ 点 ABG 故障录波图

结束语

光伏并网系统利用 RTDS/RSCAD 建模并仿真,采用 V/Q 控制方式实现光伏并网控制,简化了控制系统设计,能准确实现功率因数可调,控制效果好。通过孤岛防护装置闭环各项试验验证,RTDS 所建立的光伏并网模型是可以应用于工程实际的。

参考文献

[1] 赵争鸣,刘建政,孙晓莺,等. 太阳能光伏发电及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[2] 张兴,曹传贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制 [M]. 北京:机械工业出版社,2010.

[3] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等. 大容量并网光伏电站技术综述 [J]. 电力系统自动化,2011,35 (12): 101-107.

[4] 刘东冉,陈树勇,马敏,等. 光伏发电系统模型综述 [J]. 电网技术,2011,35 (8): 47-52.

[5] 智腾飞,王金梅,周辰,等. 优化光伏阵列运行方式的光伏电站逆变器控制策略研究 [J]. 电测与仪表,2013,50 (10): 59-63.

[6] 叶林,杨仁刚,杨明浩,等. 电力系统实时数字仿真器 RTDS [J]. 电工技术杂志,2004,23 (5): 49-52.

[7] 任立平,董兴绿,于跃海,等. 基于 RTDS 太阳能电池建模及最大功率点跟踪控制 [J]. 江苏电机工程,2011,30 (5): 17-19.

[8] 苏丽萍,陈侃,李国杰,等. 基于 RTDS 的光伏并网实时仿真平台研究 [J]. 电力系统保护与控制,2012,40 (15): 110-115.

[9] 杨帆,彭宏伟,胡为兵,等. 太阳能电池最大功率点跟踪技术探讨 [J]. 电子电器,2008,31 (4): 1081-1084.

[10] 范晓聪,方建安. 基于模糊 PID 控制的光伏并网发电系统设计 [J]. 机电工程,2010,27 (9): 104-107.

(收稿日期: 2014-01-17) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告