

大规模光伏电站电压、无功调节实时仿真系统

刘琳, 谭伟

(上海科梁信息工程股份有限公司, 上海市 200233)

Real Time Simulation Platform for Voltage and Reactive Power Regulation of Large Scale Photovoltaic Power Station

LIU Lin, TAN Wei

(Shanghai keliang information engineering co., LTD, shanghai 200233, China)

ABSTRACT: In this paper, a set of real-time simulation system of voltage and reactive power regulation for large scale new energy photovoltaic power station is designed, which realizes the AVC control in the loop simulation, emphatically introduces the modeling principle of single photovoltaic power plants and modeling of large scale photovoltaic power plant, the overall structure of AVC system function and reactive load distribution strategy, photovoltaic power plant AVC overall technical scheme and control flow, Control scheme of reactive power and voltage of photovoltaic power station communication controller, photovoltaic power station CAN communication protocol design.

KEY WORDS: Photovoltaic power; Automatic voltage control (AVC); CAN communication protocol; Real-time simulation

摘要: 本文设计了一套大规模新能源光伏电站电压、无功调节实时仿真系统, 实现了光伏电站 AVC 控制在环仿真。着重介绍了单台光伏电站的建模原理及大规模光伏电站建模的整体结构、AVC 系统功能及无功负荷分配策略、光伏电站 AVC 总体技术方案及控制流程、光伏电站通讯控制器无功电压控制方案、光伏电站 CAN 通信协议设计等。

关键词: 光伏电站; 自动电压控制 (AVC); CAN 通信协议; 实时仿真

1 引言

由于国家对光伏产业的扶持, 尤其对光伏电站上网电价和补贴长期支持, 使得光伏电站这个行业具备获得长期现金流和盈利的能力; 按照国家规划, 到 2020 年国内光伏电站装机规模为 150GW, 2015 年底我国光伏累计装机超过 43GW, 也就是说未来 5 年内光伏发电行业的年复合增长率高达 28.39%。但光伏电站与传统电站不同, 它的发电功率完全依赖太阳能, 具有很大的不确定性, 并且由于逆变器特性, 一般都无法进行无功调节。故, 为了更好的提高电网的电能质量, 本文根据电网实际情况建立大规模新能源光伏电站电压、无功调节实时仿真系统, 说明 AVC 系统功能及无功负荷分配策略、光伏电站 AVC 总体技术方案及控制流程、光伏电站 CAN 通信协议设计等^[1]。

2 光伏电站建模原理

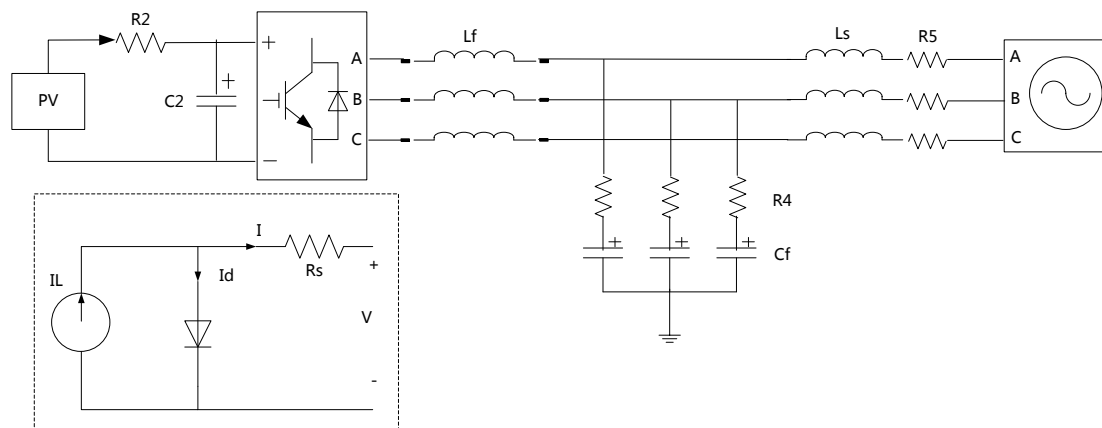


图 1 单台光伏电站模型

2.1 单台光伏电站建模原理

图1为单台光伏电站模型，光伏电池单元的等效电路模型，等效电路中忽略了并联电阻 R_{sh} 支路，由基尔霍夫电流定律得到光伏电池输出电流 I 为，

$$I = I_L - I_d = I_L - I_0 \times \left[\exp\left(\frac{q \times (V + I \times R_s)}{n \times k \times T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中 V 、 I 为光伏电池输出端电压、电流， I_L 为光伏电池短路电流， I_d 为二极管电流， I_0 为二极管饱和电流， q 为库仑常数($q=1.6 \times 10^{-19}C$)， R_s 为光伏电池等效串联电阻， n 为结常数， k 为波尔兹曼常数($k=1.38 \times 10^{-23}J/K$)， T 为光电池温度^[2]。

2.2 大规模光伏电站建模原理

大规模光伏电站(见图2)总规划装机100MW，共安装光伏电池板100MW、光伏逆变器84MW。逆变升压装置按每2MW为一个光伏发电单元进行设置。每套逆变升压装置配置4套500kVA逆变器和1台2000kVA单元变压器，将7套逆变单元高压侧并接后，通过一回线路接入35kV配电装置接入35kV汇集站系统变电站，全站共6回汇集线路。

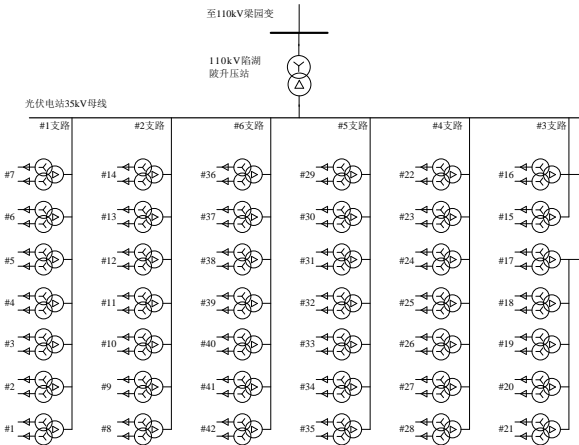


图2 大规模光伏电站一次接线图

3 AVC系统

3.1 AVC系统功能及无功负荷分配策略

AVC控制模式常用的有两种，分别为无功设定值控制模式、电压控制模式。无功设定值根据外界接收到的无功给定值设定，电压控制方式根据母线

电压参考值，折算为无功负荷，在成组控制的逆变器间、以及无功补偿装置间进行分配。

在电压控制模式下，母线电压的设定值不仅可以接收省调的设定和电站运行人员设定，也可选择投入电压曲线模型，按照跳读曲线中的电压设定值进行调节。

电压控制方式时，根据母线电压目标值，母线无功设定值按下面的公式进行计算：

$$Q_{set} = \frac{U_{target} \times (U_{target} - U_{mea})}{X} + \frac{(Q_{mea} \times U_{target})}{U_{mea}} \quad (2)$$

式中： Q_{set} 为母线无功设定值；

U_{target} 为母线电压目标值；

Q_{mea} 为母线无功实测值；

U_{mea} 为母线电压实测值；

X 为系统阻抗。

在系统第一次运行时，系统阻抗可以通过外部输入来获取设定值；当设定值超过系统规定的限值时，系统自动选取系统阻抗上限，作为计算的阻抗值；当系统调节移动次数后，系统根据获取的信息和数据，可以预测出参与下一次运算的系统阻抗值^[3]。

AVC在各成组控制逆变器间、以及无功补偿装置间进行分配的总无功，可表示为：

$$Q_{avc} = Q_{set} - \bar{Q}_{avc} \quad (3)$$

式中： Q_{avc} 为成组控制逆变器、无功补偿装置无功；

\bar{Q}_{avc} 为单独运行逆变器、无功补偿装置无功之和。

AVC以优先调节逆变器，其次调节无功补偿装置的原则调节站内无功资源。

无功负荷分配在并网逆变器间、以及无功补偿装置间采用相似调整裕度的策略。当无功设定值增加时，调节无功功率的大小根据各控制逆变器（无功补偿装置）的无功裕度大小进行分配。各个参与控制的逆变器（无功补偿装置）分配的无功大小为：

$$Q_{iset} = \frac{Q_{i\max} - Q_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{i\max} - Q_i)} \times Q_{avc} \quad (4)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

当无功设定值减少时，调节无功功率的大小根据各控制逆变器（无功补偿装置）的无功裕度大小进行分配。各个参与控制的逆变器（无功补偿装置）分配的无功大小为：

$$Q_{iset} = \frac{Q_i - Q_{i\min}}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{i\min})} \times Q_{avc} \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

式中， n 为逆变器（无功补偿装置）发出和吸收的无功已经达到上限、下限，计算时则排除无功越限的控制逆变器（无功补偿装置）^[4]。

3.2 光伏电站 AVC 总体技术方案

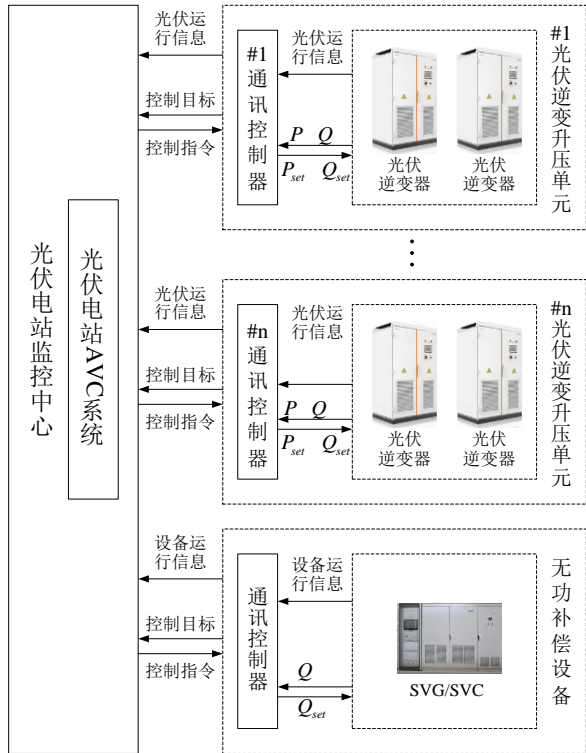


图3 光伏电站 AVC 总体控制方案

光伏电站 AVC 控制方案采用分层控制的技术方案，主要分为3层，包括：

3.2.1 工作站 AVC 系统层

工作站 AVC 系统具备计算、自动调节、监视、闭锁、通信、启动/停止顺序控制、文件记录等功能，统一协调控制并网逆变器、无功补偿装置。

工作站 AVC 系统负责从光伏电站监控系统接

收调度机构调节无功出力或者调节光伏电站并网点电压的指令，计算出光伏电站中每台逆变器、无功补偿装置需要发出的无功功率，将每台逆变器、无功补偿装置需要发出的无功功率值，并发送给光伏监控系统，由光伏监控系统下发给通讯控制器执行，实现 AVC 闭环控制功能。

3.2.2 通讯控制器层

通讯控制器的功能包括数据采集、接收光伏监控系统系统有功、无功指令和逆变器无功出力控制功能：

- 1) 数据采集：每 2 个通讯控制器作为一个单元，其中 1 台采集 1 台就地升压变压器、2 台光伏逆变器、14 台汇流箱等的的数据，采集就地升压变压器低压侧电压；另 1 台采集 2 台光伏逆变器、14 台汇流箱、门禁等的的数据。
- 2) 接收光伏监控系统系统有功、无功指令；
- 3) 将接收到的有功指令转发光伏逆变器执行
- 4) 光伏逆变器/无功补偿装置无功出力控制：

根据接收到的光伏逆变器/无功补偿装置无功出力指令、实时采集的就地升压变压器低压侧电压、通讯控制器内的 Q-V 曲线调整计算每台逆变器无功指令，并下发给光伏逆变器执行。无功电压控制系统只控制无功补偿装置稳态值，不控制暂态值。

当电网电压出现波动时，如果电压波动幅度较小，光伏逆变器未进入低电压穿越状态，则通讯控制器根据接收到的上一周期逆变器无功出力指令、实时采集的就地升压变压器低压侧电压、通讯控制器内的 Q-V 曲线快速调整计算每台逆变器无功指令，并下发给逆变器执行。一个通讯控制器闭环控制周期不大于 75ms，模拟光伏电站中的 SVC 在电网电压出现波动时的动态响应特性，以代替光伏电站中配置的 SVC。

3.2.3 光伏逆变器执行层

稳态运行时，光伏逆变器接收通讯控制器的无功指令并执行。

电网电压波动时，光伏逆变器接收通讯控制器的无功指令并执行。

电网故障出现电压跌落时，光伏逆变器屏蔽通讯控制器无功指令，进入低电压穿越状态，实现故障穿越时紧急无功支撑功能，响应时间不大于 30ms。

3.3 光伏电站 AVC 系统控制流程

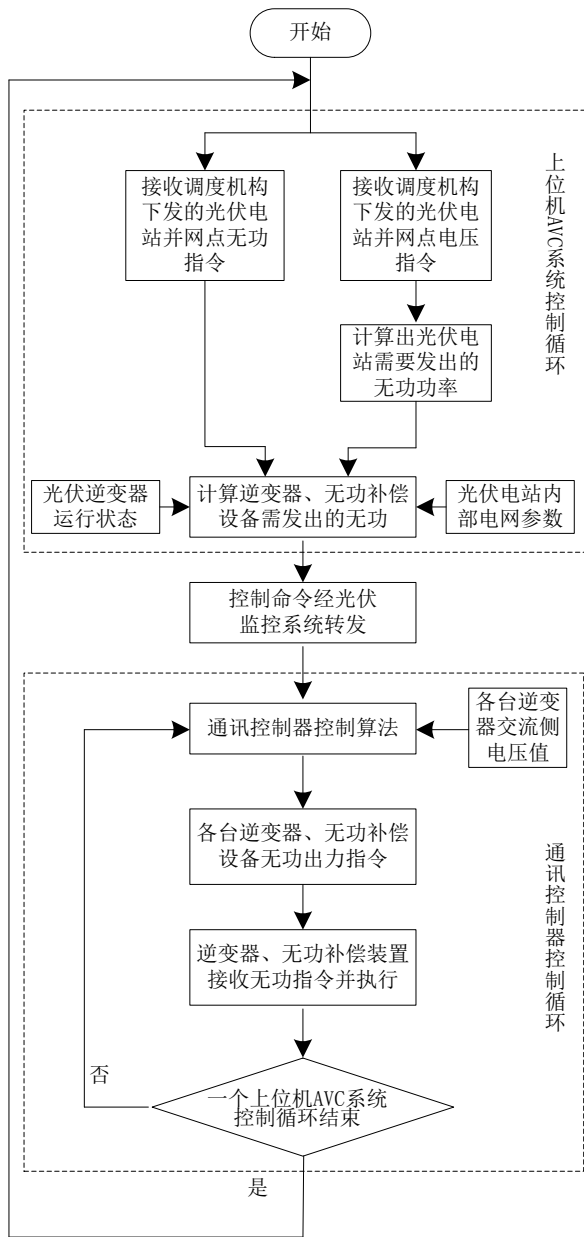


图4 光伏电站AVC控制流程图

3.4 光伏电站通讯控制器无功电压控制方案

通讯控制器负责接收上位机AVC系统计算出、经光伏监控系统转发的每台逆变器无功出力指令，并对该指令进行处理、计算后再直接下发给光伏逆变器。

3.4.1 稳态控制方案

例如：通讯控制器接收到的的每台逆变器无功出力指令时间间隔是5min，通讯控制器向逆变器下发无功出力指令的时间间隔是5s，在收到下一个上位机无功控制指令前，通讯控制器按照上一个无功控制指令运行。

3.4.2 电网电压波动时的控制方案

当电网电压出现波动时，如果电压波动幅度较小，光伏逆变器未进入低电压穿越状态，则通讯控制器根据接收到的上一周期逆变器无功出力指令、实时采集的就地升压变压器低压侧电压、通讯控制器内的Q-V曲线快速调整计算每台逆变器无功指令，并下发给逆变器执行。一个通讯控制器闭环控制周期不大于75ms，模拟光伏电站中的SVC在电网电压出现波动时的动态响应特性，以代替光伏电站中配置的SVC。

3.5 光伏电站AVC系统通信协议

光伏电站电压无功调节实时仿真系统，包含3种通信协议，分别为CAN通信协议、TCP/IP协议、PCIe通信协议；

CAN通信协议是用于光伏电站实时仿真机与下垂控制器及工作站1之间的通信协议。实时仿真机中的将采集到的数据通过CAN传输到下垂控制器，下垂控制器经过数据分析并产生控制信号又经过CAN协议传输到实时仿真机中。CAN通信采用标准帧格式，波特率定义250kB。

TCP/IP协议是实时仿真机与监控工作站2之间的通信协议，由于仿真机数据量比较多，工作站接口少，本方案采用了网络交换机进行数据的交互；

PCIe通信协议，由于仿真机数量较多，仿真机之间的数据交互接口不够，故采用的Dolphin交换机解决仿真机之间的数据交互问题。

4 仿真平台介绍

如图5为光伏电站硬件在环仿真平台，平台包含OP5600实时仿真机、工控机、下垂控制器、CAN卡、网络交换机、Dolphin交换机、工作站；

(1) 实时仿真机：实时仿真机采用OP5600和工控机两种，OP5600仿真机含有I/O接口，与SVG控制器相连，工控机接有CAN口和PCIe插槽，用于工控机与下垂控制器之间的数据通信。

(2) 工作站：工作站1，主要用于基于RT-LAB仿真平台大规模光伏电站仿真模型的搭建及仿真结果的显示及监控。工作站2为AVC系统实时运行监控平台。

(3) 下垂控制器：下垂控制器用于控制光伏电站。

(4) 交换机：Dolphin交换机用于将OP5600和工控机之间数据的传输。网络交换机用于将仿真机和工控机中的数据上传到上位机。

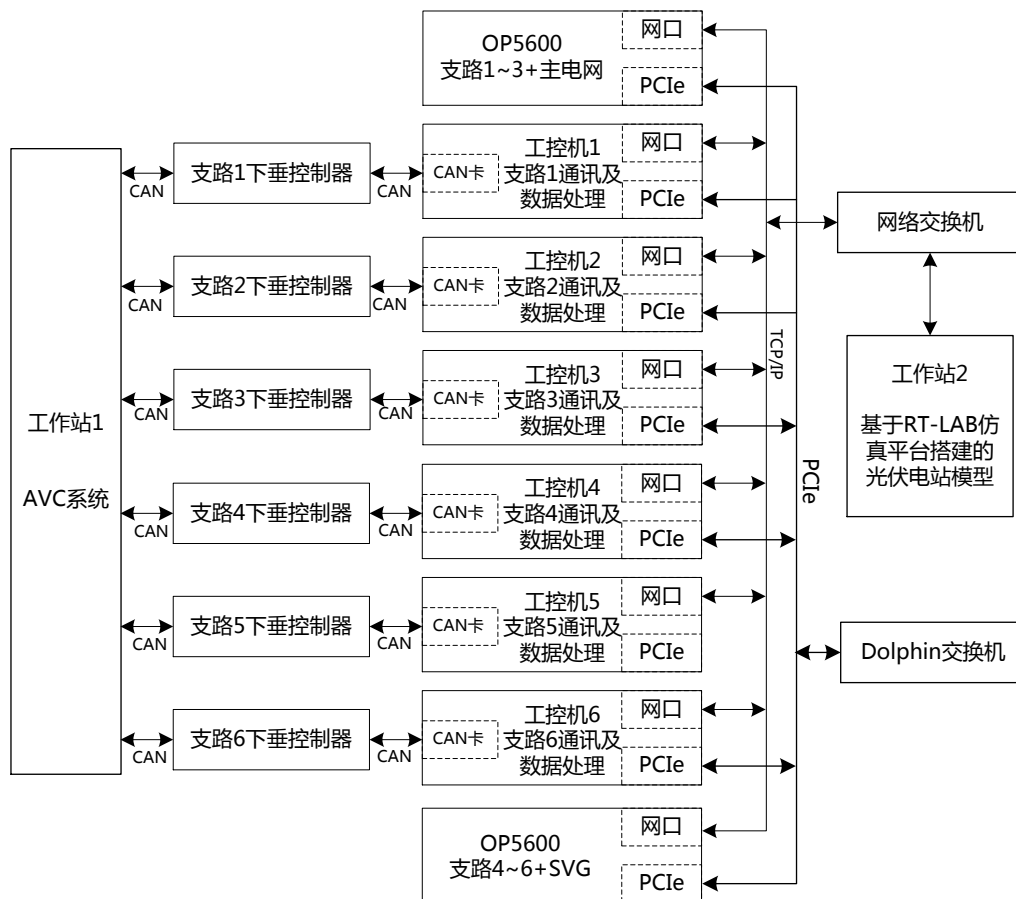


图 5 大规模光伏电站电压、无功调节实时仿真平台

5 仿真结果分析

大规模光伏电站电压、无功调节实时仿真平台，仿真结果如图 6/7/8 所示。

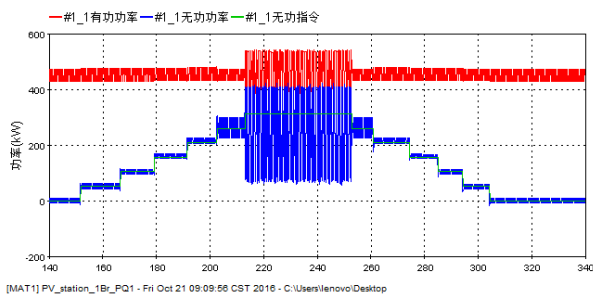


图 6 投入 7 台光伏电站，其中第一台光伏逆变器输出的

有功无功以及无功指令

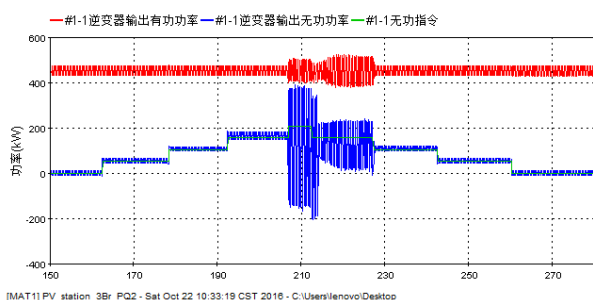


图 7 投入 21 台光伏电站，其中第一台光伏逆变器输出的

有功无功以及无功指令

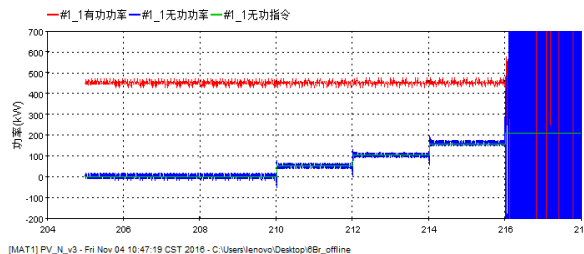


图 8 投入 42 台光伏电站，其中第一台光伏逆变器输出的

有功无功以及无功指令

通过改变投入的光伏电站数量，采集第一台光伏逆变器的有功无功指令可以看出，随着无功指令的增加和减少，单台逆变器输出的无功功率也相应的增加和减少，单台逆变器的有功功率变化很小。由于无功功率先增加后不断减少，造成各并网点处的电压也随之先增加后降低。但随着光伏电站投入数量的增加，系统稳定性变差，如图 8 所示，系统最后发散。

6 结论

光伏电站 AVC 系统的建设，为电网调度提供

了有力的功率调节工具，保证电网的安全运行，提高了电网接纳光伏电站的能力。

无功补偿协调控制系统及方法[J].电测与仪表.2015(3).101-106.

参考文献

- [1]魏世贵, 刘双.AGC/AVC 在光伏电站的应用[J].江苏电机工程, 2013 (3) .35-37.
- [2]屈爱艳, 袁玉宝, 陈洪雨等.AGC/AVC 在光伏电站的应用与实现[J].电气技术, 2016 (6) .146-148.
- [3]徐鹏, 吴雷, 杜衡.基于改进下垂发控制器的光伏并联运行控制策略[J].电力电子技术, 2012 (10) .11-13.
- [4]潘琪, 徐洋, 谢夏寅等.基于无功源的分布式光伏电站

—

作者简介:

刘琳(1987), 女, 工学硕士, 工程师, 主要从事电力系统技术方面的研究工作, lin.liu@keliangtek.com;

谭伟(1986), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电力电子技术方面的研究工作, wei.tan@keliangtek.com;