电网侧AGC控制模式下光伏电站频率控制策略研究

光伏电站基于太阳能并网输电，是当前新能源战略突破的核心领域之一。无论是大规模光伏电站还是未来太空光伏能源入网，自身特性决定了入网调频能力不足，互联电网容错能力降低。为此，针对光伏电站一次调频能力，基于光伏电站理论模型及电网侧AGC模型，建立光伏电站一次调频策略模型。通过Matlab/Simulink仿真平台，对一次调频策略进行效益仿真分析，验证了光伏电站一次调频能力，从而降低了火/水/核电站构建的电网一次调频压力，缓解了互联电网频率波动压力，提高了互联电网系统的稳定性。

马　颖／东北电力大学电气工程学院

马　颖／硕士研究生

关键词／Keywords
光伏电站·
互联电网·
一次调频·
Matlab／Simulink·

0　引言

随着光伏电站装机容量逐渐增加，环境友好型的光伏电站在未来新兴能源市场中具有广泛前景，是当前各国新能源发展的主要领域之一[1]。从未来发展来看，随着地面光伏电站应用的日益普及、太空太阳能－电能传输技术的日益成熟以及石化能源的日益枯竭，基于光伏电站的新能源利用将成为主流能源利用形式，有着不可估量的发展潜能[2]。

当前，光伏电站电能普及的痛点在于光伏电站出力存在时变性，随气象环境变化出力波动较大，光伏电站通常无法高效参与互联电网系统调频。当光伏电站容量较小时，其出力波动对互联电网的冲击影响对系统稳定性影响不大。但多分布大容量的光伏电站参与互联电网时，普遍存在不确定性和不稳定性的光伏电站将导致电网频率波动较大，无法满足系统稳定性需求。

为适应互联电网中光伏电站能力需求，解决思路通常包括：消除光伏电站并网功率波动；光伏电站参与电网侧AGC一次调频[3]。从当前研究来看，消除光伏电站并网功率波动需要在光伏电站自身增加储能装置，光伏发电系统经过自身发电、储电和电力上网多个阶段，光电转换效率不高，降低了光伏电站系统在新兴能源中的竞争力。

从现有研究成果看，新能源参与电网侧AGC频率控制，主要是以风电站为研究对象，多研究特定电网侧AGC控制模式下的一次调频策略[4]。相比于风电站，光伏电站具有自身出力快速调节的优势，能够更高效地参与电网侧AGC一次调频，分担现有电网中电站的调频压力，实现电网侧AGC的高效稳定。

基于光伏电站并网逆变器，针对电网侧AGC不同控制模式，在Matlab/Simulink仿真平台中建立光伏电站模型、并网逆变器模型和互联电网模型，对互联电网中光伏电站一次调频策略进行数值模拟验证。仿真结果表明，光伏电站一次调频策略能够实现与电网侧AGC控制模式的优化匹配。

1　光伏电站并网控制模式

光伏电站并网过程中为最大程度利用太阳能，通常采用有功功率输出控制采用最大功率跟踪控制，并网逆变器采用直流母线电压控制和无功功率控制。但在系统负载变化、光伏电站出力波动

国网宁夏电力公司基金项目：光伏电站秒级功率扰动的频率和电压主动控制技术研究。

较大的情况下，电网侧AGC控制难度变大，系统频率很难达到现有国家标准要求。因此，为提升光伏电站对现有电网侧AGC控制模式的适应性，需要设计光伏电站的频率控制策略，使光伏电站能够参与电网侧一次调频。

1.1 光伏电站准MPPT控制设计

对于MPPT控制模式[5]而言，可以达到最大程度利用光照资源的目标，但光伏电站无法通过自身调节来实现控制有功出力输出的目标。传统MPPT控制的结构框图如图1所示。

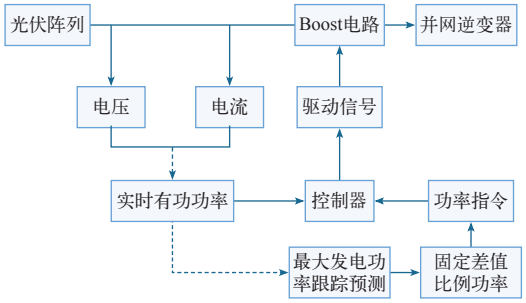

图1　定功率差值控制结构框图

为避免光伏电站有功出力不可调的窘境，使得光伏电站能够参与电网侧一次调频，提升电网频率稳定性，这里采用跟踪电网频率的功率差值控制模式，即光伏电站的准MPPT功率控制模式。在该模式下系统输入为出力调度指令、光伏电站光照强度、温度和电网实时频率等，系统输出为光伏电站按电网调度需求实现有功出力。

拟定功率点和电网侧频率跟踪值作为PID控制器输入，输出MOSFET电路的驱动脉冲。通过MOSFET电路的占空比调节，实现对光伏电站有功出力的实时跟踪调节。光伏电站频率控制模块基本结构如图2所示。

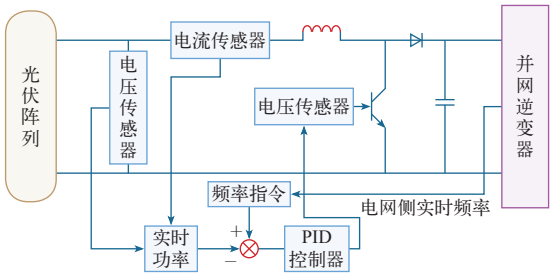

图2　光伏电站频率控制模块结构

1.2 并网逆变器控制结构设计

并网逆变器是光伏电站向电网侧输出有功功率的关键设备。并网逆变器将光伏电站的直流电转换为电网中50 Hz交流电，在这一变换过程中要求并网逆变器可靠性高、效率高。为实现无功控制和直流电压控制，设计的并网逆变器基本框图如图3所示。

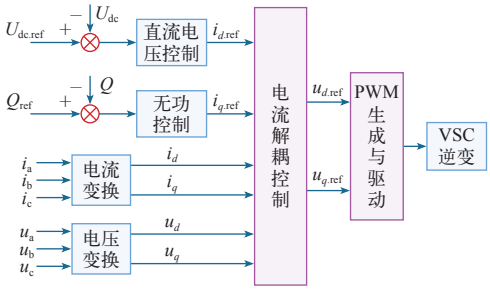

图3　逆变器控制结构框图

2　光伏电站静态功频特性分析

常规电站在参与电网侧一次调频中主要依据整定的静态功频特性来响应电网侧不均衡有功功率，实现电网侧功率稳定。

发电机组的功频静态特性系数为[6]

$$k_{G^*}=-\frac{\Delta P_G / P_{GN}}{\Delta f / f_N}=-\frac{\Delta P_{G^*}}{\Delta f_*} \tag{1}$$

式中，f_N为电网额定频率（我国规定为50 Hz）；P_{GN}为发电机组的额定有功功率；频率偏移Δf时，发电机机组功率变化值表示为ΔP_G。

3　光伏电站功频特性

光伏电站要参与电网侧一次调频，主要是通过预留功率容量以应对电网负载变化以及光伏阵列自身输出波动。这里设定光伏电站预留功率容量为最大输出功率P_m的$\sigma\%$，则光伏电站有功出力为$(1-\sigma\%)P_m$。光伏电站的减载水平可表示为

$$\sigma\%=\frac{P_{ref}}{P_m} \tag{2}$$

式中，P_m为光伏电站最大输出功率；P_{ref}为光伏电站的预留功率容量。

通过设置光伏电站预留功率容量，光伏电站

在自身有功出力变化时（光照强度出现波动），光伏电站参与电网侧一次调频的能力也会随之波动。为尽量减少光伏电站预留功率容量的影响，需要根据电网侧频率波动，对预留功率容量进行实时调整，从而确保光伏电站有功出力效益最佳，需要设计光伏电站一次调频的有功出力调频策略。

4 光伏电站一次调频策略设计

在光伏电站预留功率容量中，需要对光伏电站参与电网侧一次调频策略进行规划。当监测到电网频率波动Δf时，在原有预留功率容量P_{ref}的基础上修正ΔP，得到最终的光伏电站有功出力为P_{ref}^{*}，由此得到光伏电站有功出力的一次调频策略。修正量ΔP与频率波动量Δf的关系为

$$\Delta P = -k\Delta f \tag{3}$$

由式（1）可得

$$k = k_{\mathrm{G}^*}\frac{P_{\mathrm{GN}}}{f_{\mathrm{N}}} \tag{4}$$

式中，k_{G^*}取20。

光伏电站有功出力P_{ref}^{*}的跟踪控制流程如图4所示。

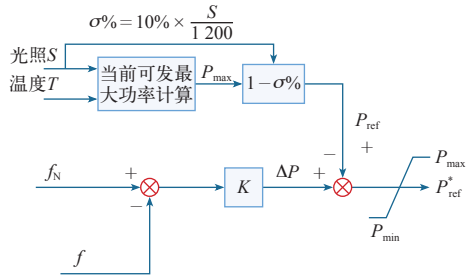

图4 功率点跟踪控制环节

由此建立了光伏电站参与电网侧一次调频的频率控制策略模型，通过跟踪电网频率，浮动光伏电站有功出力，从而达到稳定电网频率的目的。

5 仿真算例及分析

5.1 仿真环境及参数说明

研究采用Matlab/Simulink仿真环境，构建不同参数模型。光伏阵列功率容量为0.5 MW，串并联组合后与0.5 MW并网逆变器并联，构成0.5 MW光伏电站，一次调频策略采用逆变器定直流电压和无功功率控制。仿真实现中采用两个0.5 MW光伏电站并联入网，电网侧采取基于CPS信息的AGC控制模式，具体仿真结构如图5所示。

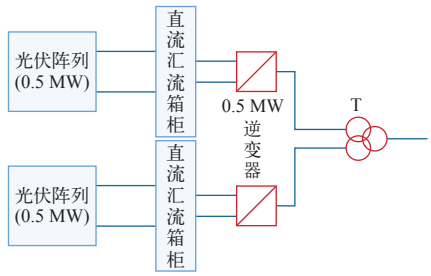

图5 光伏电站拓扑结构

光伏电站并网系统模型框图如图6所示。电网侧包含火力发电厂G_1，功率容量为1.5 MW；光伏电站G_2，功率容量为1 MW；系统负载为有功负载，功率消耗为0.7 MW、0.7 MW和0.6 MW。初始参数如下表所示。

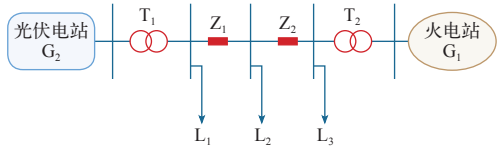

图6 仿真算例框图

表 初始参数设定

参数	初始值
光照强度/(W/m²)	1 200
光伏板温度/℃	25
火力发电厂	18.5
光伏电站	20

5.2 电网负荷突增仿真结果及分析

光伏电站并网功率为最大功率的90%，并持续跟踪电网频率偏移，当负载L_2从0.6 MW突增至0.7 MW时，光伏电站参与与不参与一次调频的数值仿真结果如图7所示。

由仿真结果可以看出，光伏电站是否参与电网侧一次调频对系统频率f、电网侧火电站出力P_{G1}和光伏电站出力P_{G2}动态响应结果差异较大。在电网负荷突增时，电网频率下降，此时光伏电站和火力发电厂同时参与系统一次调频，提高有功出力输出，能够确保电网频率波动快速平稳。

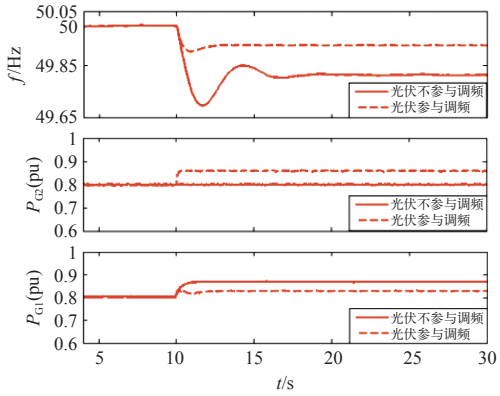

图7 电网负荷突增频率变化曲线对比

5.3 电网负荷突降仿真结果及分析

光伏电站并网功率为最大功率的90%，并持续跟踪电网频率偏移，当负载L_2从0.6 MW突降至0.5 MW，光伏电站参与与不参与一次调频的数值仿真结果如图8所示。

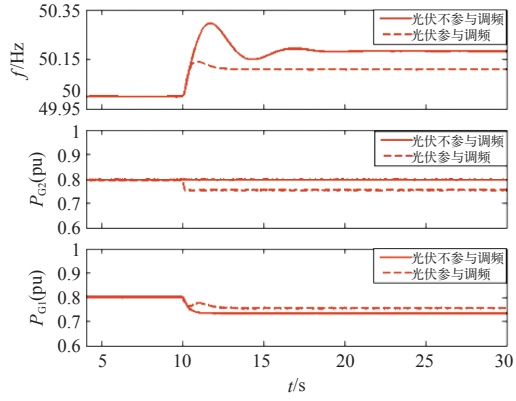

图8 电网负荷突降频率变化曲线对比

由仿真结果可以看出，对比光伏电站是否参与电网侧一次调频可以发现，在电网负荷突降时，电网频率上升，此时光伏电站和火力发电厂同时参与系统一次调频，降低有功出力输出，能够确保电网频率波动快速平稳。

5.4 光伏电站输出功率变化影响分析

光伏电站并网功率为最大功率的90%，并持续跟踪电网频率偏移，当光伏电站光照强度由1 200 W/m^{2}降低至1 000 W/m^{2}时，导致光伏电站有功出力降低。对系统频率的影响如图9所示。

由仿真结果可以看出，当光伏电站的有功出力起伏时，系统有功出现缺额，使得系统频率掉落。对比光伏电站是否参与电网侧一次调频可以

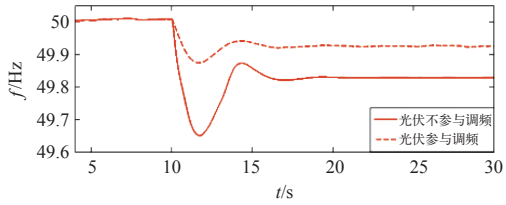

图9 光伏电站输出功率波动电网侧频率变化曲线

发现，不参与电网侧一次调频，功率缺额由火电站出力，电网侧频率下降较快，且回复到稳定频率误差较大；参与电网侧一次调频时，光照减少的有功功率则由光伏电站减载额度来提供，电网侧频率下降幅度收窄，且回复到稳定频率的误差也收窄，电网频率稳定性提升。

6 结束语

针对光电电站参与电网侧一次调频问题，通过对电网侧频率实时跟踪，浮动有功功率输出点，使得光伏电站能够参与电网侧一次调频。由理论建模及数值仿真结果可以看出，通过设计的光伏电站频率控制策略，能够有效降低电网侧频率波动幅度，光伏电站也有效分担了常规电站的一次调频压力，降低了光伏电站并网代价。

参考文献

[1] 谢富鹏，姜文刚．光伏发电系统单轴变频率追踪控制仿真 [J]．计算机仿真，2018 (6)：110-115，145．

[2] 杜宜领．光伏发电有功功率预测及电网频率控制中的应用分析 [J]．江西建材，2017 (11)：201-202．

[3] 莫槟滔，陈峦，井实，等．基于NCD优化的光－火微网频率控制方法研究 [J]．电力系统保护与控制，2017，45 (13)：14-20．

[4] 赵蓓．大型光伏电站并网频率控制策略研究 [D]．北京：华北电力大学，2015．

[5] 王新勇，许炜，汪显博，等．光伏并网逆变器固定开关频率控制策略的研究 [J]．电源技术，2011，35 (4)：443-445．

[6] 李明德，夏向阳，王锦泷，等．基于分布式电源的电网电压和频率控制优化 [J]．中国电力，2016，49 (4)：166-169．

（收稿日期：2018－04－13）EA