光伏电站抑制次同步振荡措施研究

杨亚兰[1]，巨国娇[2]，黄 睿[1]，唐榆东[1]，毕 悦[1]

（1. 国网四川省电力工业调整试验所，四川 成都 610016；2. 国网上海青浦供电公司，上海 310118）

摘要：光伏电站接入电网引发的次同步振荡问题日益突出，而现有研究几乎都未考虑SVG对系统稳定性的影响。基于实际电网仿真模型发生的次同步振荡，建立含SVG的光伏无穷大送出模型。结合西南地区某光伏电站实际数据，在PSASP中建立含光伏组件、逆变器、场站控制系统和SVG的光伏电站模型，并进行小扰动暂态仿真，仿真结果表明光伏单机无穷大系统在参数设置不合理时会产生次同步振荡，但通过优化光伏内环电流PI控制器参数及引入SVG附加阻尼控制可抑制次同步振荡，且抑制效果明显。

关键词：光伏单机无穷大；SVG；次同步振荡；PI控制器

Research on measures of inhibiting subsynchronous oscillation in photovoltaic station

YANG Yalan[1], JU Guojiao[2], HUANG Rui[1], TANG Yudong[1], BI Yue[1]

(1. Sichuan Electric Power Industry Commissioning and Testing Institute, Chengdu 610016, China; 2. State Grid Shanghai Qingpu Electric Power Supply Company, Shanghai 310118, China)

Abstract: Subsynchronous oscillation caused by photovoltaic station has been becoming more and more prominent. However, the influence of SVG on system stability has hardly been considered in current research. The model of PV station with SVG is proposed, based on the sub-synchronous oscillation in the actual power grid simulation model. In the simulation soft of PSASP, it has been established of PV station, which include PV modules, inverts, field station control system and SVG model, based on the data of a practical photovoltaic station in southwest China, and small disturbance transient simulation is carried out. The results show that the single-machine infinite bus PV system would cause subsynchronous oscillation when the parameters are unreasonable. But by optimizing the PV loop current PI controller parameters and SVG additional damping controller model parameters, the sub-synchronous oscillation couldbe inhibited, and the effect is obvious.

Key words: PV single-machine infinite bus; SVG; subsynchronous oscillation; PI controller

0 引言

次同步振荡是指电力系统的一种不正常运行状态，在这种运行状态下，汽轮发电机组和PSS、HVDC以及FACTS装置等电气设备间相互耦合，产生低于系统同步频率的某个或多个频率的振荡。早期，在汽轮机组相关区域引发过多次次同步振荡，并造成了巨大的经济损失[1-2]。

随着新能源的大量接入，电源侧的电力电子装置大范围应用，导致系统惯量降低，电网的抗干扰能力受到一定的影响，进而产生或助增次同步间谐波与电网的相互作用，引发次同步振荡[3-4]。此类问题的频繁出现及对电网的不良影响引起了学者广泛关注，但这种现象的出现及研究大都基于风电引发

或参与，其抑制措施也是从风电及同步发电机角度出发，针对由光伏电站引起的次同步振荡研究较少。次同步振荡抑制措施的研究极大地依赖于系统的模型，而目前对光伏电站模型的研究总是针对光伏发电本身，SVG作为光伏电站重要的无功补偿装置，其模型j均未引入到电力系统中，与实际应用出入较大，也是直接导致含光伏电站系统仿真不准确的原因之一。因此建立含SVG模型的光伏电站模型，研究光伏电站引发的次同步振荡抑制措施很有必要，且对理论及实践具有指导意义。

西南电网某110 kV系统含数十个容量较小的水电站及两个光伏电站，水电机组与光伏电站的额定有功功率比为2∶1。为了准确地指导该地区的方式计算，对该地区的电力系统综合稳定模型进行仿真，仿真发现，该电力系统模型自身存在缺陷，导致小扰动仿真处于振荡状态，无稳态模式。为了深入分析研究问题，对该电网中的光伏电站单独搭建无穷大模型，从电力电子装置的角度提出了现有光伏电站的系统模型，通过优化光伏内环电流控制器参数及投入SVG的附加阻尼控制来实现光伏电站接入系统引发的次同步振荡抑制。

1 光伏无穷大系统

1.1 光伏电站系统结构图

光伏接入无穷大系统的模型框图如图1所示，光伏电站由光伏阵列、逆变器、集电线路、升压站以及SVG无功补偿装置组成，光伏电站通过多条集电线路汇入升压站，SVG与集电线路并于站内同一低压母线。在末端送出电网，尤其是电网结构比较薄弱的情况下，SVG对电站母线的电压起到极大的支撑作用，从接线方式上来讲，SVG作为与集电线路并列的一条支路接入低压母线，其作用不可小觑，在建模仿真的过程中，必须考虑SVG对系统的影响[5]。

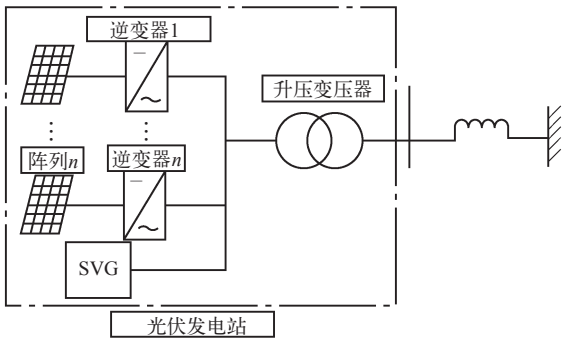

图1 光伏无穷大系统接线图

Fig. 1 Single machine infinite bus system with PV

1.2 光伏区模型

1.2.1 光伏阵列模型

根据用电负荷、电压和光照等情况，光伏阵列通过多个光伏组件串联或并列而成。当光伏组件并列时，总的输出电压为各组件工作电压的平均值，而总电流为各光伏组件的工作电流之和。光伏电池的等效电路如图2所示[6]。

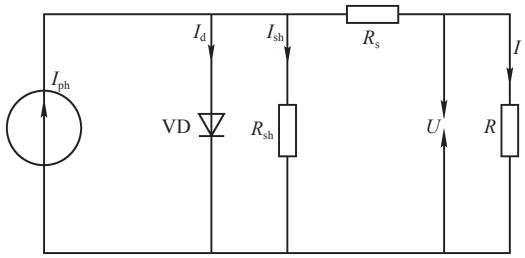

图2 太阳能电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of solar cell

图2中，I_{ph}为理想电流源，VD为反向二极管，R_s、R_{sh}分别为电阻，I_{ph}为光生电流，标准测试条件为工作温度为25 ℃，光照强度为1 000 W/m^2，则光伏发电系统中的电流电压输出特性方程为

$$I_{pv}=n_p\{I_{ph}-I_{os}\{\exp[\frac{q(U+IR_s)}{AkT}]-1\}\} \quad (1)$$

$$U_{pv}=\frac{n_s nkT}{q}\ln(\frac{n_p I_{SCS}G_r-I_{pv}}{n_p I_o}+1) \quad (2)$$

式中，I_o为饱和电流；I_{SCS}为标准测试调节下的短路电流；G_r为光照强度；K_t为短路电流的温度系数；q为电子电荷，取1.6×10^{-19}C；k为玻尔兹曼常数，取1.38×10^{-23}J/K；A为光伏电池半导体的PN结系数。

1.2.2 光伏逆变器建模

并网逆变器控制系统主要有DC/DC和DC/AC构成的两级式和由DC/AC构成的单级式，前者DC/DC输出直流电压，通过调整光伏阵列的工作点来实现MPPT的控制，DC/AC部分通过PMW脉宽调制控制输出与电网频率相位相同的电流，两个环节相对独立，对于提高逆变环节的效率效果显著，两级式逆变控制的拓扑结构如图3所示[7-9]。

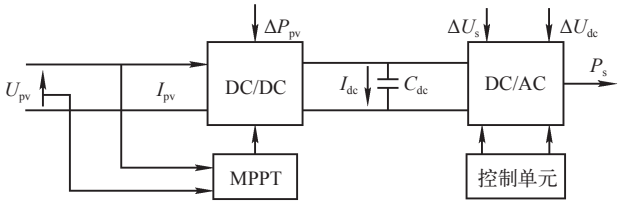

图3 两级式逆变系统

Fig. 3 Two-stage inverter system

在两相旋转坐标系下通过dq轴变换，即

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} = L\omega i_q - Ri_d + U_{td} - U_d \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} = L\omega i_d - Ri_q + U_{tq} - U_q \end{cases} \tag{3}$$

由式（3）可以得知，光伏并网控制是一个多变量耦合的过程，为了达到良好的控制效果，需要采取解耦控制策略，通常有PI串级解耦、电流无差拍控制和输出平抑控制策略。这里以PI解耦控制为例，控制结构图如图4所示。

忽略非线性因素的影响，控制器的传递函数为

$$G(s) = \frac{K_{\mathrm{PWM}}K_{\mathrm{f}}(k_{\mathrm{p}}s + k_{\mathrm{i}})}{s(R + Ls)(T_{\mathrm{f}} + 1)} \tag{4}$$

式中，反馈环节K_{f}=1，T_{f}=1；K_{PWA}为PWM控制环节的等效比例系数。

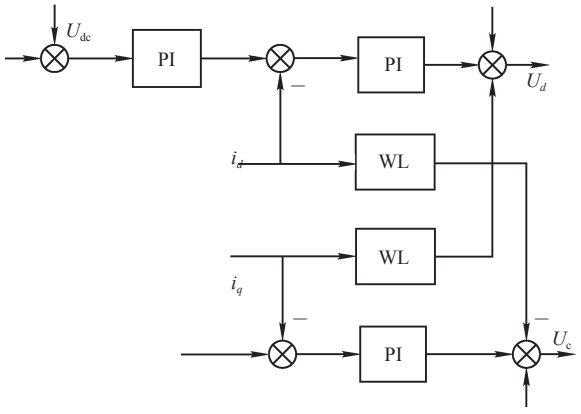

图4 控制结构图

Fig. 4 Control system diagram

因此，在逆变器硬件结构配置一定的情况下，通过调节k_{p}、k_{i}的值就可以改变系统的传递函数结构，进而影响系统的稳定性。

1.3 SVG建模分析研究

SVG作为静止无功补偿装置，通过电压型桥式电路或电流型桥式电路直接接到系统，或者通过接入电感再接入系统，当SVG交流侧电压和电流的相关参数发生变化时，输出侧的无功功率也会发生变化[10-11]。某种意义上，对电网而言，SVG相当于一个快速连续输出无功的电流源装置。控制方式有恒电压、恒无功和恒功率因数等，根据电网的实际要求及现场的调试现状来选取。

PSASP中对应的电压偏差控制环节传递函数如图5所示。模型包含一阶惯性环节、两级超前滞后和比例积分等环节，不同的参数对系统的动态特性将产生不同的影响[12-13]。

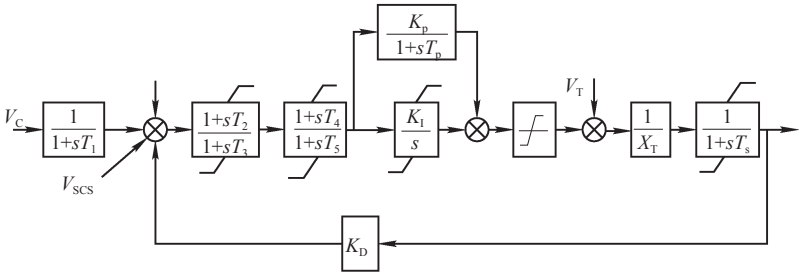

图5 SVG电压控制模型框图

Fig. 5 Voltage control model of SVG

2 现状分析

四川某一末端电网，为了合理地研究系统的暂态稳定性，规划电网送出容量，进行了稳定计算仿真。该电网中，水电装机容量与光伏发电容量占比为2∶1，在历史运行过程中，多次发生稳定问题。在光伏送出比相对较大的情况下，电网的电压多次发生了次同步振荡，如图6所示。

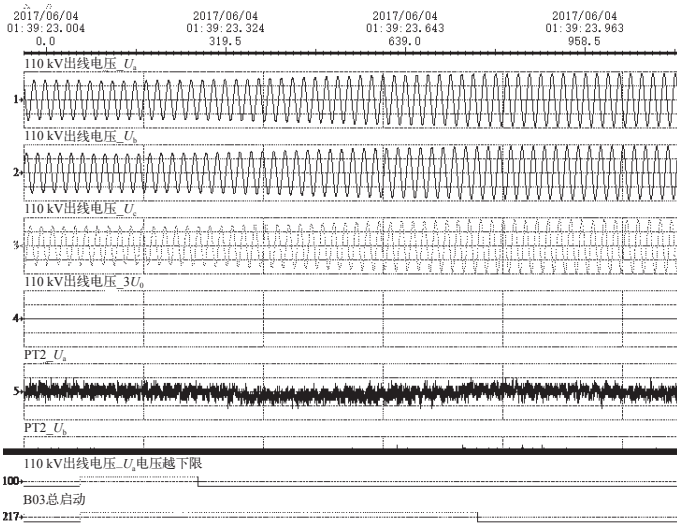

图6 110 kV电压振荡放大图

Fig. 6 110 kV drawing of voltage oscillation

仿真模型中，几乎所有的水电机组都未进行励磁系统的建模及参数的整定，系统阻尼较弱，且光伏电站的模型对系统的稳定计算起到了重要的作用，甚至在含光伏运行的情况下，系统本身是不稳定的。

仿真时系统暂态稳定现象异常，存在送出受限以及振荡的问题，通过对模型的核实发现，仿真模型关于光伏发电系统没有考虑SVG的部分，与实际电站结构不符，由于弱电网中，SVG对系统无功的支撑起了很大的作用，另外GB/T 32826—2016《光伏发电系统建模导则》要求，光伏发电系统中无功补偿设备要单独建模，为了整定正确的参数，需要对光伏模型深入展开分析。

3 仿真分析

目前，已有一些措施的研究及应用来抑制次同步振荡，例如避开谐振点、提高电气阻尼、阻断次同步电气量以及基于FACTS装置的抑制方法。避开谐振点的抑制方法往往无法真正地消除次同步振荡，且经济性较差；提高电气阻尼的抑制方法针对系统负阻尼引起的失稳现象，通过设计附加阻尼控制器，补偿系统的阻尼力矩来提高系统的稳定性，附加阻尼控制作为辅助环节叠加到相应的主控系统，其抑制容量受主控系统容量限制，提供的阻尼效果有限；阻断次同步电气量的方法通过阻塞滤波器来实现，但滤波器的参数整定较困难，参数一旦整定不当，就会引起新的问题；基于FACTS技术的发展为次同步振荡的抑制提出了新的解决思路，目前应用普遍。

3.1 PSASP仿真模型

在原始模型中，光伏电站仅考虑了光伏发电单元的模型，如图7所示。由于整个光伏站中，光伏单元通过逆变器为系统提供有功，同时为系统提供无功的部分不仅有光伏发电部分，还有SVG，即无功补偿装置，尤其在电网结构薄弱的地区，SVG的无功调节能力极大地支撑了电网的无功。因此，按照传统的方式将光伏电站等效为含逆变器的光伏发电单元部分是片面的。图7中，PVMX为光伏电站的光伏发电部分。

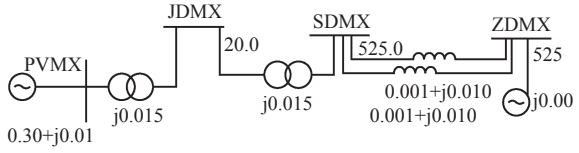

图7 光伏无穷大模型

Fig. 7 PV infinity bus model

3.2 光伏无穷大系统仿真

通过对该仿真模型的光伏电站建模，在接入SVG后的无穷大模型中，系统出现了发散的次同步振荡，系统不稳定，有功振荡曲线如图8所示。这就说明，当计及更详细的光伏电站模型后，由于电力电子控制环节的相互作用，发生了耦合现象，恶化了系统的稳定性。

3.3 并入水电机组仿真

由于该电网中，水电机组较多，当水电

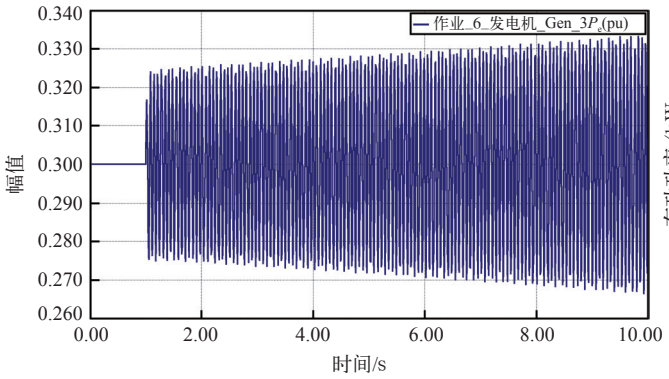

图8 次同步振荡曲线

Fig. 8 Curve of synchronous oscillation

机组接入母线SDMX与光伏一起送出时，暂态稳定干扰曲线如图9所示。图9中，光伏输出的功率曲线（Gen_3）也是呈现次同步振荡特征，且振荡发散。因此可以认为，光伏的接入对本来稳定的系统产生了影响，而究其原因，在于光伏模型本身存在缺陷。

图9中，水电机组输出有功曲线为图9中Gen_2P(pu)，光伏电站输出有功曲线为图9中Gen_3P_e(pu)。

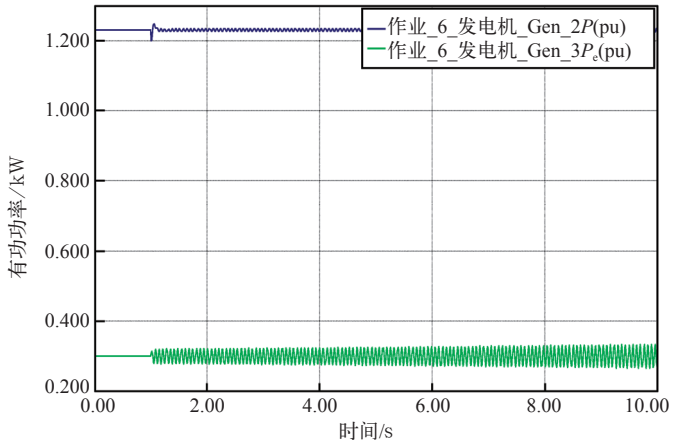

图9 并入水电机组后的振荡曲线

Fig. 9 Oscillation curve with hydro unit

3.4 考虑SVG模型接入

当含SVG的光伏模型与水电机组一起参与送出时，光伏电站的输出暂态稳定干扰曲线如图10所示，也是次同步振荡发散。

3.5 SVG附加阻尼控制

为了提高系统的稳定性，充分利用SVG的控制性能，抑制和补偿由光伏模型本身引起的次同步振荡，引入SVG的附加阻尼控制。

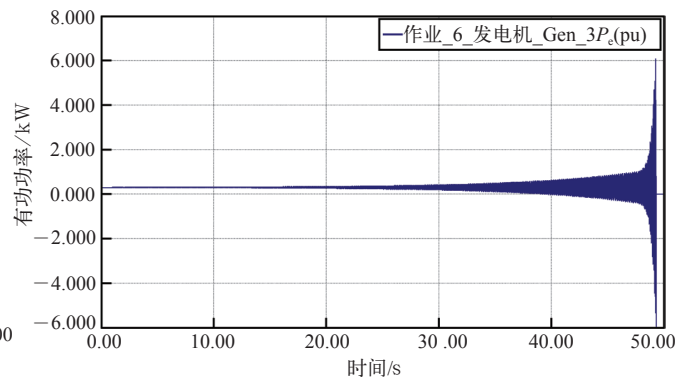

图10 含SVG与水电机组的光伏电站有功输出曲线

Fig. 10 Oscillation curve with SVG and hydro unit

作为快速变换的无旋转部件的电力电子装置，SVG的控制与逆变器的双环控制逻辑类似，分为外环电压及内环电流控制[13-14]，研究表明，SVG本身的控制环节对系统的稳定性影响不明显，但附加阻尼控制部分对稳定性影响较大。传递函数如图11所示，模型为双输入，将功率、电压和电流等信号通过滤波隔直环节及超前滞后及比例输出附加电压补偿，以维持输出端电压或无功功率的恒定。

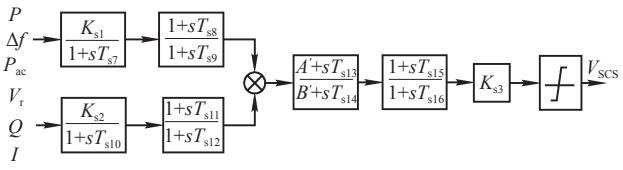

图11 SVG辅助控制环节传递函数

Fig. 11 Transfer function of SVG auxiliary control

为了达到优化参数的目的，利用粒子群算法，以光伏输出有功曲线的阻尼比最大为目标，考虑光伏PI控制器及SVG的交互作用，进一步优化控制器参数。通过计算，再次仿真，当光伏电站与水电站并联接入末端电网时的小干扰稳定曲线如图12所示。当光伏电站单独接入无穷大系统时，小干扰稳定曲线如图13所示。由此可见，系统的稳定性有了极大的改善。

4 结束语

大规模新能源电站接入引发的次同步振荡问题日益突出，针对西南某地区电网模型存在的稳定问题，对其中的光伏电站建立无穷大模型，仿真发现光伏控制器参数模型在电网小扰

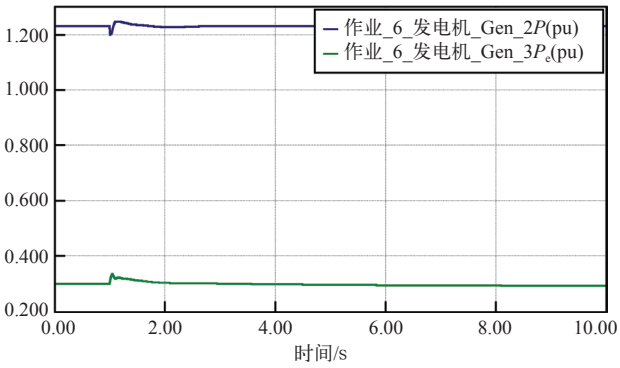

图12 优化后的曲线

Fig. 12 Simulation curve of PV and hydro after optimized

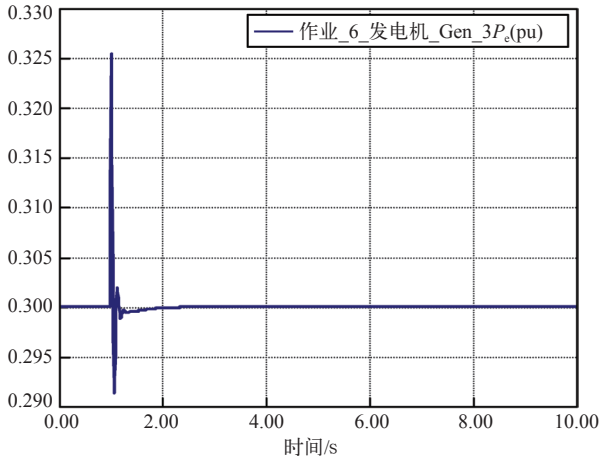

图13 优化后的光伏无穷大仿真曲线

Fig. 13 Simulation curve of PV after optimized

动情况下存在次同步振荡现象。而现有的光伏电站模型都没有将SVG作为考虑对象，从而造成仿真模型的不准确。为此，本文通过建立含SVG的光伏电站模型来研究抑制次同步振荡的措施，结果表明，通过优化光伏内环电流PI控制器参数可以抑制由光伏电站引起的次同步振荡。调整SVG模型自身控制器的参数并不会对系统的稳定性产生影响，但是引入SVG附加阻尼控制，可以有效地抑制次同步振荡。

参考文献

[1] ZHANG Y，ZHU S Z，SPARKS R，et al．Impacts of solar PV generators on power system stability and voltage performance[C]．2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting，San Diego，CA，IEEE，2012：1-7.

[2] SHAH R，MITHULANANTHAN N，LEE K Y．Large-scale PV plant with a robust controller considering power oscillation damping[J]．IEEE Transactions on Energy Conversion，2013，28(1)：106-114.

[3] 文劲宇，孙海顺，程时杰．电力系统的次同步振荡问题[J]．电力系统保护与控制，2008，36(12)：1-7.

[4] 何晨颖．光伏并网的次同步振荡问题研究[D]．武汉：华中科技大学，2018.

[5] 光伏发电系统建模导则：GB/T 32826—2016[S].

[6] 柴亚盼，金新民，童亦斌，等．局部遮挡下光伏阵列的建模与仿真研究[J]．电测与仪表，2013，50(12)：17-20，41.

[7] 张鹏．交直流系统次同步振荡建模与机理分析[D]．北京：华北电力大学，2014.

[8] 刘吉臻．新能源电力系统建模与控制[M]．北京：科学出版社，2019.

[9] 高本峰，姚磊，李忍，等．大规模光伏电站并网的振荡模式分析[J]．电力自动化设备，2017，37(8)：123-130.

[10] 樊懋．光伏电站无功补偿装置的交互影响及协调控制[D]．西安：西安理工大学，2017.

[11] 周佩朋，李光范，宋瑞华，等．直驱风机与静止无功发生器的次同步振荡特性及交互作用分析[J]．中国电机工程学报，2018，38(15)，4369-4378.

[12] 王雪薇，谢欢，刘青，等．SVG对风电次同步振荡的影响[J]．华北电力技术，2017(6)：37-47.

[13] 于弘洋，王英沛，刘宗烨，等．次同步间谐波对链式换流器的影响分析[J]．电网技术，2018，42(12)：4101-4107.

[14] 耿俊成，刘文华，俞旭峰，等．链式STATCOM的数学模型[J]．中国电机工程学报，2003，23(6)：66-70.

作者简介



杨亚兰

杨亚兰（1989－），女，硕士，工程师，主要研究方向为网源协调技术研究。

(收稿日期：2019－07－26)EA