

文章编号:1006-2467(2022)09-1118-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.415

大规模光伏发电经串补输电线路并网系统 强迫次同步振荡机制

林 勇¹, 康佳乐², 余 浩¹, 陈鸿琳¹, 杨彦霖³, 陈武晖²

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广州 510080; 2. 太原理工大学
电气与动力工程学院, 太原 030024; 3. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 大规模光伏经串补并网系统存在次同步振荡失稳风险, 传统研究一般基于负阻尼振荡理论对此进行解释. 本文将因最大功率跟踪控制(MPPT)导致的光伏间谐波作为扰动源, 大规模光伏经串补并网系统作为受迫系统, 采用强迫振荡理论揭示光伏发电基于扰动式 MPPT 与串补并网系统相互作用的次同步振荡机制, 并在 PSCAD/EMTDC 仿真平台进行验证. 结果表明: 基于扰动式 MPPT 的光伏逆变器因交直流侧的调制耦合作用向系统输出间谐波电流, 当该间谐波频率与系统固有弱阻尼模式频率接近时, 可能导致严重的强迫次同步振荡问题, 对系统稳定性造成冲击; 算例仿真验证了所提理论的正确性.

关键词: 光伏; 间谐波; 次同步振荡; 强迫振荡

中图分类号: TM 721 **文献标志码:** A

Mechanism of Forced Subsynchronous Oscillation of Large-Scale Photovoltaic Power Generation Grid-Connected System with Series Compensation Transmission Lines

LIN Yong¹, KANG Jiale², YU Hao¹, CHEN Honglin¹, YANG Yanji³, CHEN Wuhui²

(1. Grid Planning and Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;
2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024,
China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University,
Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: There exists the subsynchronous oscillation (SSO) instability risk in large-scale photovoltaic (PV) grid-connected systems with series compensation, which is generally explained by the negative damped oscillation theory. In this paper, the inter-photovoltaic harmonics due to maximum power point tracking (MPPT) control are used as the disturbance source and the large-scale PV grid-connected system with series compensation as the forced system. The forced oscillation theory is used to reveal the SSO mechanism of PV power generation based on the interaction between the perturbed MPPT and the series compensation grid-connected system, and verified in the PSCAD/EMTDC simulation platform. The results show that the perturbed MPPT-based PV inverter outputs interharmonic currents to the system due

收稿日期: 2021-10-18

基金项目: 南方电网公司科技项目(037700KK52190013 (GDKJXM 20198287))

作者简介: 林 勇(1973-), 男, 四川省广安市人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划技术.

通信作者: 陈武晖, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 0351-6010031; E-mail: chenwuhui@tyut.edu.cn.

to the modulation coupling on the AC-DC side, which may lead to serious forced SSO problems when the interharmonic frequency is close to the frequency of inherent weakly damped mode of the system, causing a shock to the system stability. The simulation results verify the correctness of the proposed theory.

Key words: photovoltaic(PV) ; interharmonic; subsynchronous oscillation(SSO); forced oscillation

电力电子技术的快速发展促进了新能源并网大规模的开发利用,以风电、光伏为代表的高比例新能源并网成为未来电力系统发展的趋势. 光伏出力受环境影响显著,具有显著的随机性、间歇性,同时作为并网接口电力电子变流器存在非线性特征,这两者将给电网带来复杂的谐波问题,并可能引起振荡稳定^[1-5]. 文献[5]记录了实际光伏电站并网的录波数据,证实了光伏并网存在大量谐波.

新能源出力具有随机性、波动性,导致新能源发电系统输出电流频谱复杂且频率时变,这些间谐波可能造成电力系统振荡稳定性问题. 文献[6]表明处于次同步频段的间谐波分量与邻近发电机轴系机械振荡的相互作用,将会诱发系统次同步振荡,进而危及电力系统的安全稳定运行. 此外,间谐波不仅可以激发电机组的轴系固有弱阻尼模式,还可能激发电力系统中其他弱阻尼模式进而引发强迫振荡^[7];文献[8]分析了新疆哈密直驱风机次同步振荡事故特征,提出事故实质为直驱风机间谐波激发的风电控制系统模态引发的强迫次同步振荡.

新能源并网系统产生的间谐波可能诱发强迫振荡,因此揭示间谐波产生机制及特性对于抑制系统振荡具有重要意义^[7-8]. 不同工作频率系统的相互调制会产生间谐波^[9-10],文献[8]建立低频间谐波频率与风机转速关系的数学模型,分析了间谐波分布情况及时变性;文献[10]分析了光伏逆变器直流电压扰动引起的间谐波幅频与相频特性;文献[11-16]指出光伏逆变器的扰动式最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)将导致其在外环境恒定时持续输出间谐波,并对间谐波特性进行了分析.

目前,对于光伏次同步振荡机制的研究主要以负阻尼理论为主,基于系统的小信号线性化模型,利用阻抗法、特征值法研究系统稳定性^[17-21]. 文献[22]建立光伏并网系统的序阻抗模型,并应用序阻抗模型研究了光伏电站接入弱交流电网时次同步振荡的机理和特点;文献[23-24]对光伏并网系统进行特征值分析,发现光伏并网系统中存在次同步振荡模式,并分析了光伏并网系统参数对次同步振荡特性的影响. 上述研究成果多集中于大规模光伏并网系统的

间谐波产生原因及光伏并网系统的负阻尼次同步振荡特性,但未关注光伏间谐波(激励源)与光伏并网系统(受迫系统)相互作用引发的强迫次同步振荡研究机制.

综上所述,本文揭示了光伏逆变器的扰动式 MPPT 产生的间谐波激发强迫次同步振荡机理. 主要研究内容如下:首先,结合调制理论研究,基于扰动式 MPPT 光伏逆变器的直流电压扰动与输出间谐波之间的数学关系,分析了间谐波产生机制;其次基于小信号模型特征值分析系统振荡特性;然后揭示间谐波激励受迫系统引发强迫振荡的机理及特性;最后,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台建立详细的电磁暂态模型,验证了理论的正确性.

1 大规模光伏经串补并网系统

1.1 大规模光伏并网拓扑结构

以青海某大规模光伏串补系统为研究对象,系统主要由大型光伏电站、各电压等级变压器、输电线路等构成,如图 1 所示. 整个系统由多个 100 MW 的大型光伏电站升压后汇流至 330 kV 母线,然后经 330 kV/750 kV 升压变电站汇入主电网. 假设每个光伏电站的 330 kV 线路阻抗均相同,记为 Z_1 ; 750 kV 线路阻抗记为 Z_2 ; 750 kV 变电站共包含 i 台 330 kV/750 kV 变压器,每台变压器对应 m 个光伏电站进行升压.

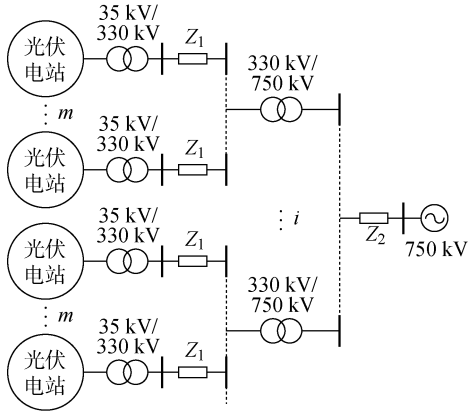


图 1 大规模光伏经串补并网系统拓扑结构
Fig. 1 Topology of a large-scale photovoltaic system with series compensation

则表明当前工作点位于 MPP 的左侧,此时系统应保持增加参考电压的扰动方式,即 $U_{dc}^*(k) = U_{dc}^*(k-1) + \Delta U$.

(2) 若 $P(k) > P(k-1)$ 且 $U(k) < U(k-1)$, 则表明当前工作点位于 MPP 的右侧,此时系统应保持减少参考电压的扰动方式,即 $U_{dc}^*(k) = U_{dc}^*(k-1) - \Delta U$.

(3) 若 $P(k) < P(k-1)$ 且 $U(k) > U(k-1)$, 则表明当前工作点位于 MPP 的右侧,此时系统应采用减少参考电压的扰动方式,即 $U_{dc}^*(k) = U_{dc}^*(k-1) - \Delta U$.

(4) 若 $P(k) < P(k-1)$ 且 $U(k) < U(k-1)$, 则表明当前工作点位于 MPP 的右侧,此时系统应采用增加参考电压的扰动方式,即 $U_{dc}^*(k) = U_{dc}^*(k-1) + \Delta U$.

综上,扰动式 MPPT 通过比较各电气量的大小关系,实现最大功率点跟踪,同时上述过程可利用下式进行定量描述:

$$U_{dc}^*(k) = U_{dc}^*(k-1) + \text{sgn}(dP/dV)\Delta U \quad (1)$$

式中: $\text{sgn}(X)$ 为阶跃函数, X 为正时, $\text{sgn}(X)$ 输出为 1, X 为负时, $\text{sgn}(X)$ 输出为 -1; dP 、 dV 分别为前后周期光伏电源输出功率差值、直流电压差值,即 $dP = P(k) - P(k-1)$, $dU = U(k) - U(k-1)$. 为获取优良的 MPPT 效果,扰动式 MPPT 扰动步长与扰动间隔应当匹配^[25],较小的扰动步长一般需要较高的扰动频率,以此保证 MPPT 准确追踪基础上获得最大的实时输出功率.

扰动观测法是广泛使用的 MPPT 算法,但是在外部温度及日照辐射恒定时,其在 MPP 附近存在三点式振荡现象^[25],不断调整光伏逆变器直流电压,导致直流电压按照一定频率波动,直流电压脉动经逆变器调制到交流系统,进而产生间谐波.设扰动观测法采样周期为 T_{MPPT} ,振荡中心点电压等于 U_{mpp} .在此情况下, U_{dc}^* 的振荡周期为 $4T_{\text{MPPT}}$,则对式(1)进行傅里叶分解,可得其等效输出:

$$U_{dc}^*(t) = U_{\text{mpp}} + \sum_{n=1, 3, 5, \dots} U_n \cos(2n\pi f_s t + \varphi_n) = U_{\text{mpp}} + \frac{2\Delta U}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots} \frac{1}{n} \left(\cos \frac{n\pi}{4} - \cos \frac{3n\pi}{4} \right) \times \cos(2n\pi f_s t + \varphi_n) \quad (2)$$

式中: f_s 为 MPPT 三点式振荡的基波频率,且 $f_s = 0.25T_{\text{MPPT}}$; n 为谐波次数; U_n 和 φ_n 为 n 次谐波的等效振荡幅值及初始相位; t 为时间.一般情况下将 ΔU 设置为几伏至十几伏不等,相应的 $T_{\text{MPPT}} = 0.001 \sim 0.5$ s,则一般有 $f_s = 0.5 \sim 25$ Hz.

由式(2)可知,在外部温度及日照辐射恒定时,基于扰动式 MPPT 的光伏逆变器的直流电压存在持续扰动,采样周期及扰动步长将直接决定其扰动特性.在式(2)直流电源指令作用下,逆变器输出电流的 d 轴分量为

$$I_{cd}(t) = I_{cd0} + \sum_{n=1, 3, 5, \dots} I_{cdn} \cos(2n\pi f_s t + \varphi_{dn}) \quad (3)$$

式中: I_{cd0} 为 d 轴电流直流分量; I_{cdn} 和 φ_{dn} 分别为 d 轴电流扰动分量幅值和相位.由此可见,逆变器输出电流的 d 轴分量中同样存在扰动量,其振荡频率与 MPPT 直流电压扰动相同. I_{cdn} 值的大小与直流电压扰动频率、扰动幅值均成正相关^[11].通过派克反变换,将逆变器输出 d 、 q 轴分量电流转换至 abc 三相坐标系:

$$\begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{cd} \\ I_{cq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: I_{ca} 、 I_{cb} 和 I_{cc} 为逆变器输出的 abc 三相电流.一般情况下,光伏电站不向系统提供无功支撑,此时有 $I_{cq}^* = 0$,稳态时 $I_{cq} = 0$,即可认为 d 、 q 轴电流完全解耦,可得:

$$\left. \begin{aligned} I_{ca} &= I_{cd0} \cos(2\pi f_0 + \varphi_0) + \frac{1}{2} \sum_{n=1, 3, 5, \dots} I_{dn} \cos[(2\pi n f_s + 2\pi f_0)t + \varphi_{dn} + \varphi_0] + \frac{1}{2} \sum_{n=1, 3, 5, \dots} I_{dn} \cos[(2\pi n f_s - 2\pi f_0)t + \varphi_{dn} + \varphi_0] \\ I_{cb} &= I_{cd0} \cos(2\pi f_0 + \varphi_0 - 2\pi/3) + \frac{1}{2} \sum_{n=1, 3, 5, \dots} I_{dn} \cos[(2\pi n f_s + 2\pi f_0)t + \varphi_{dn} + \varphi_0 - 2\pi/3] + \frac{1}{2} \sum_{n=1, 3, 5, \dots} I_{dn} \cos[(2\pi n f_s - 2\pi f_0)t + \varphi_{dn} + \varphi_0 + 2\pi/3] \\ I_{cc} &= I_{cd0} \cos(2\pi f_0 + \varphi_0 + 2\pi/3) + \frac{1}{2} \sum_{n=1, 3, 5, \dots} I_{dn} \cos[(2\pi n f_s + 2\pi f_0)t + \varphi_{dn} + \varphi_0 + 2\pi/3] + \frac{1}{2} \sum_{n=1, 3, 5, \dots} I_{dn} \cos[(2\pi n f_s - 2\pi f_0)t + \varphi_{dn} + \varphi_0 - 2\pi/3] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: f_0 为系统工频; φ_0 为系统工频电流的初始相位; I_{dn} 为 abc 坐标系下 n 次特征谐波产生的正序间谐波幅值. 由可知, 当 U_{dc}^* 值存在如式(1)所示的扰动时, 逆变器输出三相电流存在频率分别为 $f_0 \pm nf_s$ ($n = 1, 3, 5 \dots$) 的正序间谐波分量.

2.2 光伏经串补并网系统强迫振荡机理分析

基于强迫振荡理论, 对间谐波扰动所激发的大规模光伏发电经串补并网系统强迫次同步振荡机制进行分析. 出于一般性考虑, 图 1 所示的大规模光伏发电经串补并网系统线性化模型在模态空间解耦, 对于该系统的任意一对主导模态均对应一个 2 阶线性齐次常微分方程^[7]:

$$m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + n \frac{d \Delta x}{dt} + k \Delta x = 0 \quad (6)$$

式中: Δx 为方程状态变量. 等式左边等值光伏发电经串补系统, 即受迫振荡系统, 含串补输电系统/控制系统的固有振荡模式, 则该固有模态角频率 ω_n 和阻尼比 ζ 可以由式(6)求解, 表示为

$$\left. \begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} \\ \zeta &= \frac{n}{2\omega_n m} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

光伏交流系统中除含有基波主导分量外, 还存在频率分别为 $f_0 \pm nf_s$ ($n = 1, 3, 5 \dots$) 的正序间谐波分量, 为建模这些间谐波的作用, 在式(6) 右边施加一个角频率 $\omega = 2\pi nf_s$ (通常只考虑 $n = 1$ 的情况) 的强迫分量, 则可得一个 2 阶线性非齐次常微分方程:

$$m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + n \frac{d \Delta x}{dt} + k \Delta x = F_0 \cos \omega t \quad (8)$$

式中: F_0 和 ω 分别为次同步间谐波的幅值和角频率. 等式右侧表示间谐波扰动源, 此处为光伏逆变器因 MPPT 产生的次同步频段间谐波.

根据 2 阶线性常微分方程解的结构, 式(8)的解由通解和特解两部分组成:

$$\Delta x = \Delta x_1(t) + \Delta x_2(t) \quad (9)$$

式中: $\Delta x_1(t)$ 为通解, 是与式(8)对应的齐次微分方程式(6)的解, 也称自由分量; $\Delta x_2(t)$ 为特解, 即为式(8)的稳态解, 也称强迫分量, 代表间谐波小扰动引起的稳态分量.

求解式(6), 可得式(8)的通解:

$$\Delta x_1(t) = e^{-\zeta \omega_n t} (B_1 \cos \omega_d t + B_2 \sin \omega_d t) \quad (10)$$

式中: B_1 和 B_2 为光伏系统初始条件决定的常数; ω_d 为角频率, 且

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (11)$$

由式(10)可知, $\Delta x_1(t)$ 为暂态分量, 光伏系统固有参数决定其振荡形态; 系统正阻尼时, 该分量衰减消失; 系统负阻尼时, 该分量则呈现出发散振荡.

由式(8)求解可得特解:

$$\Delta x_2(t) = B \cos(\omega t - \varphi) \quad (12)$$

式中: B 为 $\Delta x_2(t)$ 的振荡幅值; φ 为相位, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_n \omega \zeta)^2}} \\ \tan \varphi &= \frac{\omega n/m}{\omega_n^2 - \omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

作为间谐波小扰动引起的稳态分量, $\Delta x_2(t)$ 的振荡频率与扰动频率相同. 其幅值和相位取决于受迫光伏系统的固有特性和间谐波小扰动. 结合式(12)和(13), 引起光伏强迫次同步振荡的主要条件如下:

(1) 光伏逆变器输出间谐波频率与受迫系统固有频率接近. 当 ω 接近 $\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 时, 振幅 B 趋向最大值 B_{\max} . 通常情况下 $\zeta^2 \ll 1$, 因此也可以认为当 $\omega = \omega_n$ 时发生谐振. 当光伏逆变器 MPPT 中扰动观测法引起的间谐波频率与系统固有模态频率接近时, 所激发的强迫振荡幅值最大.

$$B_{\max} = \frac{F_0/m}{2\omega_n^2 \zeta \sqrt{1 - \zeta^2}} \approx \frac{F_0/m}{2\omega_n^2 \zeta} \quad (14)$$

(2) 受迫系统的次同步振荡模式阻尼较弱. 由式(14)可知, ζ 与 B_{\max} 近似成反比关系, 即次同步振荡模式阻尼越小, 所激发的强迫振荡幅值越大.

(3) 光伏间谐波小扰动需要达到必要的幅值. 由式(14)可知, F_0 与 B_{\max} 成正比, 即 F_0 越大, 则 B_{\max} 越大. 光伏电站中光伏发电单元高度集中, 一般采用同厂家光伏设备, 其 MPPT 技术相同, 因此各光伏逆变器产生的间谐波频率接近, 易积累出一定的幅值, 从而对系统稳定性造成严重威胁.

3 算例仿真实证

参照图 1 中大规模光伏经串补并网系统的拓扑结构图, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建电磁暂态时域仿真模型. 系统基准容量为 1 000 MW, 基准频率为 50 Hz, 其他电气参数如表 1 所示.

光伏电站中单个发电单元的直流侧电压和电容分别为 0.78 kV 和 7 800 μ F, 并网点电压为 0.48 kV, 其他参数如表 2 所示. 其中, k_{p1} 、 k_{i1} 和 k_{p2} 、 k_{i2} 分别为电流内环 d 、 q 轴的比例和积分参数, k_{p3} 和 k_{i3} 分别为直流电压外环的比例和积分参数, k_{p4} 和 k_{i4} 分别为锁相环比例和积分参数.

表 1 交流系统参数
Tab.1 Parameters of AC system

设备数量	电压等级	变压器			输电线路	
		漏电抗(p.u.)	励磁电流/%	额定容量/(MV·A)	电压等级/kV	线路阻抗(p.u.)
$i=4$	0.48 kV/35 kV	0.065	0.65	1	330	$Z_1=0.039+\text{j}0.297$
$m=3$	35 kV/330 kV	0.140	0.44	240	750	$Z_2=0.015+\text{j}0.196$
$n'=200$	330 kV/750 kV	0.150	0.10	500		

表 2 光伏逆变器参数
Tab.2 Parameters of photovoltaic inverter

电流控制参数	直流电压控制参数	锁相环参数	交流侧滤波器
$k_{p1}=k_{p2}=0.5$	$k_{p3}=3.5$	$k_{p4}=50$	$L_f=0.6\text{ mH}$
$k_{i1}=k_{i2}=12.5$	$k_{i3}=285$	$k_{i4}=10\ 000$	$R_f=0.5\ \Omega$
			$C_f=35\ \mu\text{F}$

3.1 光伏经串补并网系统固有次同步振荡模式

根据光伏并网系统 dq 坐标系下的小信号模型^[23-24]和表 1 以及表 2 所示算例参数,计算大规模光伏经串补系统的特征值,结果如表 3 所示.其中 f 为频率,系统共有 14 个模式,包含 5 个振荡模式.

为获取优良的 MPPT 效果,扰动式 MPPT 扰动步长与采样时间间隔应当匹配^[25],结合式(2)分析可知,与光伏扰动 MPPT 频率接近的光伏逆变器控制系统的次同步振荡模式为 $\lambda_{7,8}$.根据参与因子分析可知,模式 $\lambda_{7,8}$ 由系统锁相环参数主导,当 k_{p4} 和 k_{i4} 变化时, $\lambda_{7,8}$ 的变化轨迹如图 5 所示.

由图 5 可知,随着 k_{p4} 的增加, $\lambda_{7,8}$ 阻尼增加频率

略有降低;随着 k_{i4} 的增加, $\lambda_{7,8}$ 阻尼减小频率增加.系统在特定的锁相环参数下呈现弱阻尼的次同步振荡模式,存在与光伏间谐波相互作用的强迫振荡风险.此外,在不合理的锁相环参数下, $\lambda_{7,8}$ 呈现负阻尼特性,存在自激失稳风险.

表 3 光伏系统特征值
Tab.3 Eigenvalues of photovoltaic system

模式	特征值	f/Hz	$\zeta/\%$
$\lambda_{1,2}$	$-389.420\pm\text{j}6\ 906.484$	1 099.200	5.630
$\lambda_{3,4}$	$-391.137\pm\text{j}6\ 293.558$	1 001.651	6.203
$\lambda_{5,6}$	$-0.898\pm\text{j}313.284$	49.861	0.287
$\lambda_{7,8}$	$-6.670\pm\text{j}61.992$	9.866	10.698
$\lambda_{9,10}$	$-0.079\pm\text{j}3.272$	0.521	2.438
λ_{11}	-807.660	—	—
λ_{12}	-792.464	—	—
λ_{13}	-25.803	—	—
λ_{14}	-25.758	—	—

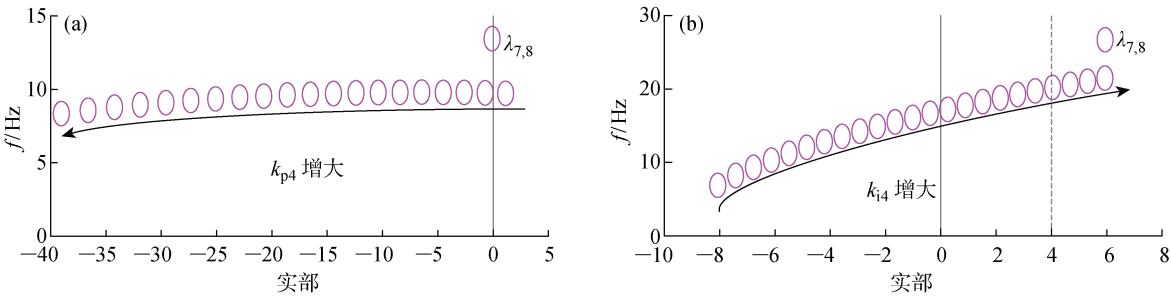


图 5 次同步振荡模式特征值轨迹
Fig.5 Eigenvalue trajectory of subsynchronous oscillation mode

3.2 光伏间谐波验证

为验证 2.1 节光伏间谐波产生机制,在 PSCAD/EMTDC 中搭建光伏逆变器并网仿真模型,算例光伏发电单元参数设置参考单个发电单元参数(见表 2).单级式光伏并网逆变器采用扰动观测法作为 MPPT 算法,设 $\Delta U=10\text{V}$ 、 $T_{\text{MPPT}}=0.1\text{ s}$;

外部环境维持恒定,光照辐射强度为 $800\text{ W}/\text{m}^2$,温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$.在此算例参数下,逆变器直流电压、输出电流波形及 FFT 分析结果如图 6 所示.其中, A 为谐波幅值.

由图 6 可知,当算例逆变器采用扰动式 MPPT 时,直流电压及逆变器输出电流 d 轴分量中包含

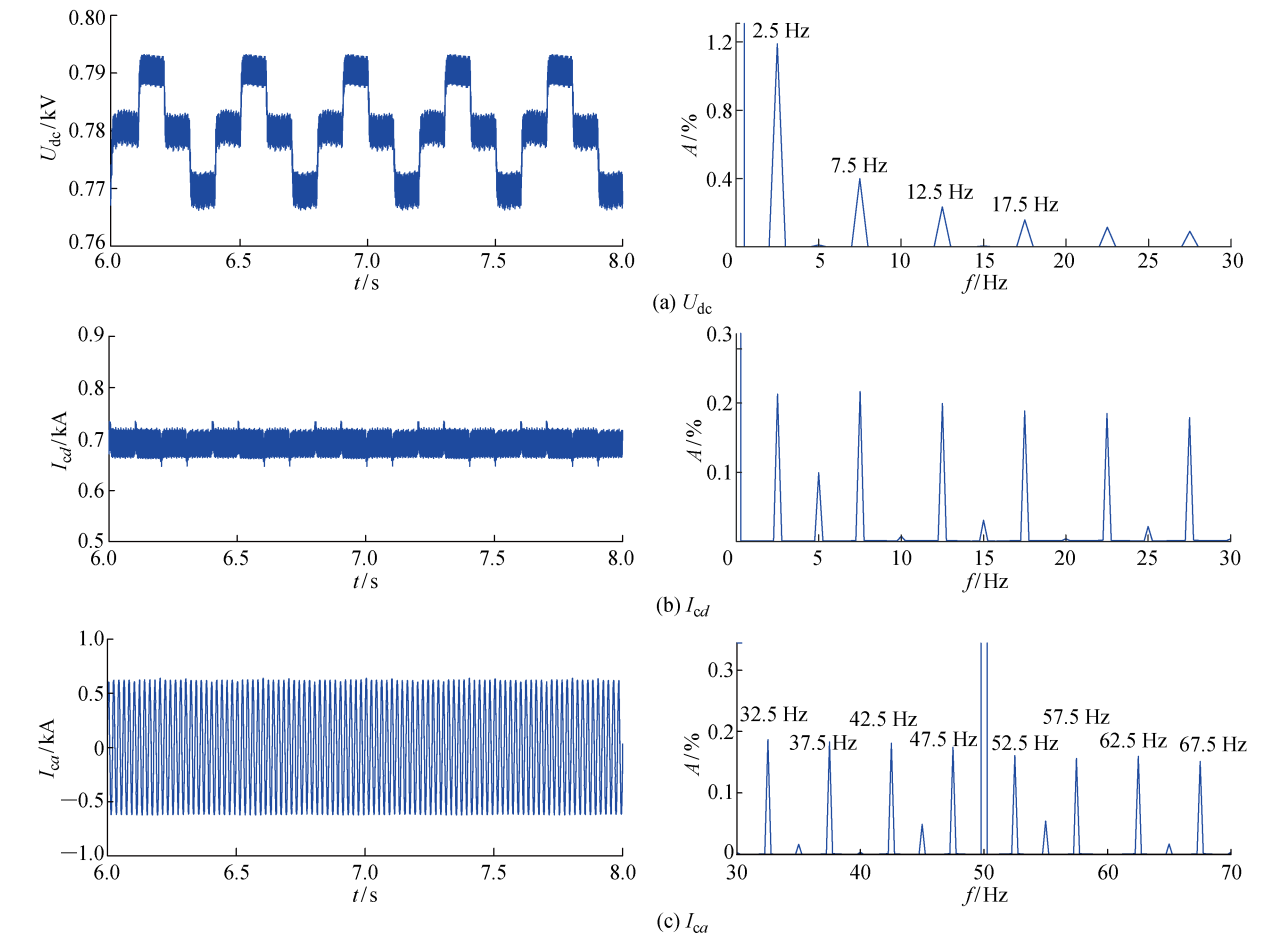


图 6 扰动式 MPPT 光伏间谐波时域仿真及频谱分析结果

Fig. 6 Time domain simulation and spectrum analysis results of disturbance MPPT photovoltaic interharmonics

$f=2.5, 7.5, 12.5, 17.5$ Hz 的扰动量,交流侧并网电流主要包含 52.5 Hz/47.5 Hz、57.5 Hz/42.5 Hz、62.5 Hz/37.5 Hz、57.5 Hz/32.5 Hz 的间谐波分量,分析结果与 2.1 节内容相对应.光伏逆变器直流电压同一频率扰动分量将导致逆变器输出电流产生两个幅值相同,其频率之和为 2 倍频基频的间谐波电流分量.根据式(5)可知,扰动观测法将在逆变器直流电压造成 $n=1, 3, 5 \cdots$ 的奇数次谐波扰动,导致逆变器输出间谐波成分复杂^[11-12].

3.3 光伏串补系统强迫次同步振荡

对图 1 所示的固有弱阻尼振荡模式与光伏间谐波之间交互影响下的强迫振荡现象进行电磁暂态仿真.需要明确的是,基于 d, q 轴下的小干扰动态模型所得系统固有振荡模式对应于系统的 d, q 轴分量,即系统的直流量;逆变器输出间谐波在 d, q 轴下的扰动分量频率与系统固有振荡模式相接近,并满足于式(13)推导出的 3 个次同步强迫振荡发生的条件.

3.3.1 间谐波频率的影响 根据 2.3 节研究成果,

在大规模光伏经串补并网系统中,次同步振荡模式的阻尼较弱且频率段与 f_s 较为吻合,有可能被激发出强迫振荡.同样基于 PSCAD/EMTDC 平台建立时域仿真模型,利用前文算例,保留变压器励磁支路的大规模光伏经串补并网系统电气参数,并调节系统锁相环参数至 $k_{p4}=20, k_{i4}=10\,000$ 时,系统固有振荡模式对应的特征值为 $-0.727 \pm 9.679 \times 2\pi$.基于扰动式 MPPT 基本原理,在直流电压指令值中直接施加式(2).考虑小扰动计算误差后,以系统固有振荡频率 9.769 Hz 为中心的微调系统光伏并网逆变器所发出的间谐波频率,设置系统运行至 40 s 时施加直流电压扰动,直流电压扰动幅值(U_h)恒定为 5 V,不同扰动频率(f_h)时系统并网有功功率(P')及无功功率(Q)波形如图 7 所示.可知,当 $f_h=9.35$ Hz 时,系统振荡幅值最大,如图 7(c)所示,则 9.35 Hz 即为系统实际的固有振荡频率.当间谐波激励频率与系统固有频率一致时,强迫次同步振荡幅值最大;随着激励频率与固有频率相差越大,振荡幅值越小,与式(13)分析的条件一致.

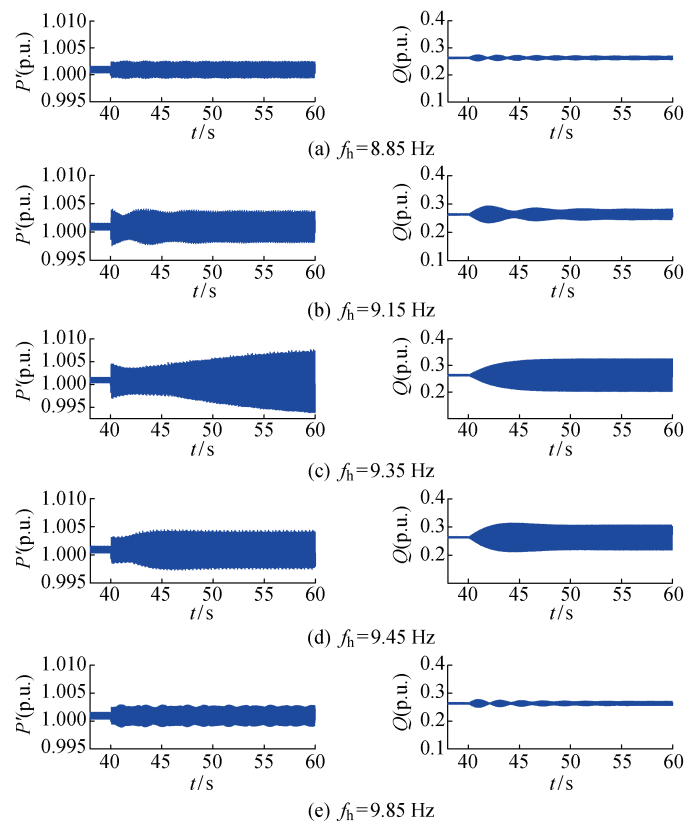


图 7 不同频率直流电压扰动下系统时域仿真结果

Fig. 7 System time domain simulation results at different frequency DC voltage disturbances

3.3.2 间谐波幅值的影响 通过改变直流电压扰动幅值调整间谐波扰动幅值,分析间谐波幅值对系统振荡的影响. 设定算例系统参数与图 7 中一致,固定 $f_h=9.35\text{ Hz}$,不同 U_h 值时系统时域仿真结果如图 8 所示. 可知,随着 U_h 值的增加,系统强迫次同

步振荡幅值也逐步增加,两者成近似正比关系,与理论分析一致. 值得注意的是,在图 8(d)中,由于受迫系统被激发的强迫振荡幅值过高,振荡开始发散导致系统失稳,所以当光伏并网系统固有模态为正阻尼时,仍然可能发生幅值较大的次同步振荡.

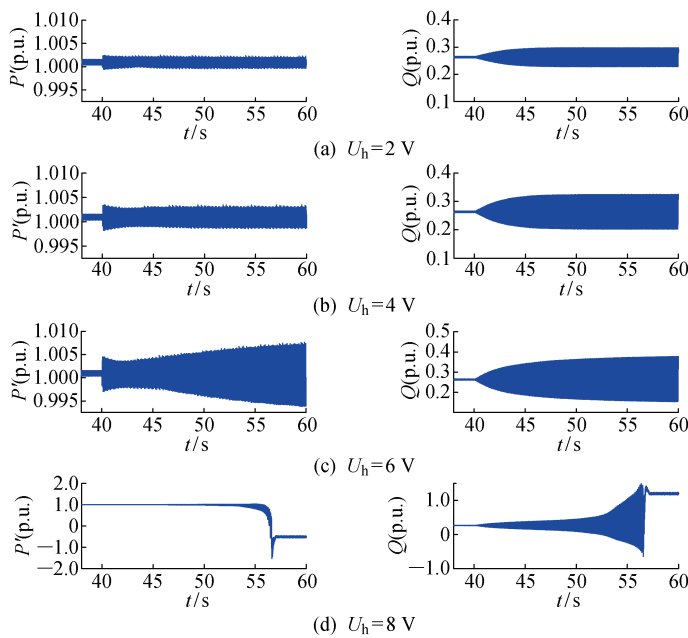


图 8 不同幅值直流电压扰动下系统时域仿真结果

Fig. 8 Time domain simulation results of system at different amplitude DC voltage disturbances

4 结论

本文从强迫振荡的角度对大规模光伏发电经串补并网系统的次同步振荡机理及动态特性开展研究。首先分析了基于扰动式 MPPT 光伏逆变器间谐波特性;其次分析了光伏发电强迫次同步振荡的发生机理及特性;最后在 PSCAD/EMTDC 中验证了理论的正确性。主要结论如下:

(1) 基于扰动式 MPPT 的光伏并网逆变器在外部环境稳定时发出间谐波,该间谐波作为光伏经串补并网系统的扰动源,在光伏控制系统固有次同步振荡模式相互作用下,大规模光伏发电经串补并网系统存在强迫次同步振荡风险,当光伏并网系统固有模态为正阻尼时,仍然可能发生幅值较大的次同步振荡。

(2) 大规模光伏发电经串补并网系统作为受迫系统强迫次同步振荡的条件:间谐波幅值较大,间谐波频率与系统中某个固有次同步振荡模式的频率接近,系统存在呈现弱阻尼的固有次同步振荡模式;间谐波幅值越大、间谐波频率与系统固有次同步振荡模式越接近则引发的系统强迫振荡的振荡幅值越大。

参考文献:

- [1] OLIVA A R, BALDA J C. A PV dispersed generator: A power quality analysis within the IEEE 519 [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2003, 18 (2): 525-530.
- [2] HAKIMI S, HAJIZADEH A. Integration of photovoltaic power units to power distribution system through modular multilevel converter[J]. **Energies**, 2018, 11(10): 2753.
- [3] KATIRAEI F, AGÜERO J R. Solar PV integration challenges[J]. **IEEE Power and Energy Magazine**, 2011, 9(3): 62-71.
- [4] ZHONG Q, FENG J J, LIN L X, *et al.* Graphical presentation of harmonic operating principles in voltage source converter with sparse vector methods[J]. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2017, 11(4): 1033-1038.
- [5] LI C. Unstable operation of photovoltaic inverter from field experiences[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2018, 33(2): 1013-1015.
- [6] SOLANICS P, KOZMINSKI K, BAJPAI M, *et al.* The impact of large steel mill loads on power generating units[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2000, 15(1): 24-30.
- [7] YACAMINI R. Power system harmonics. part 4: Interharmonics[J]. **Power Engineering Journal**, 1996, 10(4): 185-193.
- [8] CHEN W H, YU X, HAN X Q, *et al.* Analysis of forced SSOs excited by subsynchronous interharmonics from DPMSG-based wind farms[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2021, 12(2): 978-989.
- [9] DU Y, LU D D C, JAMES G, *et al.* Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions[J]. **Solar Energy**, 2013, 94: 182-194.
- [10] DU Y, LU D D C, CHU G M L, *et al.* Closed-form solution of time-varying model and its applications for output current harmonics in two-stage PV inverter [J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2015, 6(1): 142-150.
- [11] SANGWONGWANICH A, YANG Y H, SERA D, *et al.* Analysis and modeling of interharmonics from grid-connected photovoltaic systems[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2018, 33(10): 8353-8364.
- [12] SANGWONGWANICH A, YANG Y H, SERA D, *et al.* Interharmonics from grid-connected PV systems: Mechanism and mitigation[C]// **2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia**. Taiwan, China: IEEE, 2017: 722-727.
- [13] LANGELLA R, TESTA A, DJOKIC S Z, *et al.* On the interharmonic emission of PV inverters under different operating conditions[C]// **2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power**. Belo Horizonte, Brazil: IEEE, 2016: 733-738.
- [14] LANGELLA R, TESTA A, MEYER J, *et al.* Experimental-based evaluation of PV inverter harmonic and interharmonic distortion due to different operating conditions[J]. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2016, 65(10): 2221-2233.
- [15] PAKONEN P, HILDEN A, SUNTIO T, *et al.* Grid-connected PV power plant induced power quality problems—Experimental evidence [C]// **2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)**. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2016: 1-10.
- [16] RAVINDRAN V, RÖNNBERG S K, BUSATTO T, *et al.* Inspection of interharmonic emissions from a grid-tied PV inverter in North Sweden [C]// **2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power**. Ljubljana, Slovenia: IEEE, 2018: 1-6.
- [17] 赵书强, 李忍, 高本锋, 等. 光伏并入弱交流电网次同步振荡机理与特性分析[J]. **中国电机工程学报**,

2018, 38(24): 7215-7225.

ZHAO Shuqiang, LI Ren, GAO Benfeng, *et al.* Analysis of mechanism and characteristics in sub synchronous oscillation between PV and weak AC networks[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2018, 38(24): 7215-7225.

[18] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. **中国电机工程学报**, 2020, 40(22): 7185-7201.

JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(22): 7185-7201.

[19] 贾祺, 严干贵, 李泳霖, 等. 多光伏发电单元并联接入弱交流系统的稳定性分析[J]. **电力系统自动化**, 2018, 42(3): 14-20.

JIA Qi, YAN Gangui, LI Yonglin, *et al.* Stability analysis of multiple paralleled photovoltaic power generation units connected to weak AC system[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(3): 14-20.

[20] LU G F, MIAO M, YU X, *et al.* Impact of series compensation on operation performance of large-scale PV plants[J]. **The Journal of Engineering**, 2017(13): 2569-2573.

[21] LI F, HUANG Y, WU F, *et al.* Research on clustering equivalent modeling of large-scale photovoltaic power plants[J]. **Chinese Journal of Electrical Engineering**, 2018, 4(4): 80-85.

[22] ZHAO S Q, LI R, GAO B F, *et al.* Subsynchronous oscillation of PV plants integrated to weak AC networks[J]. **IET Renewable Power Generation**, 2019, 13(3): 409-417.

[23] YAN G G, CAI Y R, JIA Q, *et al.* Stability analysis and operation control of photovoltaic generation system connected to weak grid[C]// **2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration**. Beijing, China: IEEE, 2017: 1-6.

[24] HUANG H Q, MAO C X, LU J M, *et al.* Small-signal modeling and analysis of grid-connected photovoltaic generation systems [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2012, 32(22): 7-14.

[25] FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G, *et al.* Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2005, 20(4): 963-973.

(本文编辑:孙伟)