

文章编号:0254-0096(2020)03-0255-07

光伏并网对低频振荡的影响与抑制

白 凡, 王宝华

(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

摘 要: 以大型光伏电站并入多机电力系统为研究对象,通过模式分析和时域仿真的方法,首先推导出光伏电站并入多机系统的状态方程线性化模型,然后搭建含光伏电站的四机两区域测试系统。研究表明:光伏电站的不同接入地点以及不同渗透率对多机系统低频振荡会产生影响,光伏电站并网后并未产生新的振荡模式。采用综合功率调制设计的光伏广域附加阻尼控制器可以抑制低频振荡。

关键词: 模式分析; 光伏电站; 时域分析; 低频振荡; 综合功率调制; 附加阻尼控制器

中图分类号: TM914.4 **文献标志码:** A

0 引 言

近年来随着可再生能源的快速发展,大量的光伏电站已经投入使用,如加拿大的安大略电站,乌克兰的贝鲁沃电站和中国的格尔木电站等^[1]。中国光伏发电主要呈现“规模化分散开发、低压接入、就地消纳”和“大规模集中开发、中高压接入、高压远距离外送消纳”这2种方式^[2]。随着光伏渗透率的提升,其对电网的安全稳定性产生了影响。

基于单机无穷大系统,文献[3]推导出光伏并网线性化状态方程组,并未涉及多机系统。文献[4]通过改变光伏电站的光照强度、接入地点和接入容量,借助PSAT仿真验证,提高光伏渗透率可以增加低频振荡模式的阻尼,并未具体分析该模式与光伏电站的关系。文献[5]通过模式分析与时域仿真阐明光伏并网对系统低频振荡的影响可能是正面或者负面的,需要关键同步发电机或是其他能够提供阻尼的装置配合抑制低频振荡,并未考虑光伏电站直接参与抑制。文献[6]提出基于线性二次高斯设计的功率振荡阻尼控制器,结果表明该控制器可以为区间振荡模式提供足够的阻尼,该控制器的结构与传统PSS相比较为复杂。文献[7]基于单机无穷大系统,通过理论与仿真得出有功和无功综合调制可以抑制振荡。

本文在已有的研究基础上,推导并建立含光伏电站的多机系统状态方程组及其线性化模型。采用模式分

析法研究不同接入点、不同渗透率的光伏电站对低频振荡的影响,并通过DIgSILENT时域仿真验证模式分析的正确性。提出一种采用综合功率调制法设计的多机系统光伏附加阻尼控制器,仿真结果表明该控制器可抑制电力系统低频振荡。

1 光伏发电系统建模

文献[8]研究了光照强度如何影响光伏并网系统的小干扰稳定性,分析结果表明光照强度的改变并不会导致系统小干扰不稳定。光伏发电系统如图1所示。图中, C_{dc} 是直流滤波电容, L_r 是等效滤波电感, \bar{U}_k 是逆变器交流侧电压, \bar{U}_{pv} 是节点g电压, \bar{I}_{pv} 是电感电流。

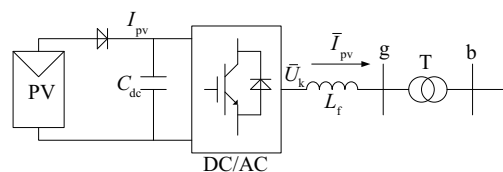


图1 光伏发电模型

Fig. 1 Photovoltaic power generation model

文献[9-10]提出工程实用模型,该模型需要厂家提供标准条件下(电池温度为25℃,光照强度1000 W/m²)4个参数值即:光伏阵列短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 、最大功率点电流 I_m 、最大功率点电压 U_m 。

光伏逆变器采用电压电流双环解耦控制策略。电压外环的控制目标为保持逆变器直流侧电压稳定,电流

收稿日期: 2017-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(51607036)

通信作者: 王宝华(1968—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究。wangbaohua@163.com

内环的控制目标为跟踪电网电压,保证并网电流的稳定可靠。光伏逆变器控制策略如图 2 所示。

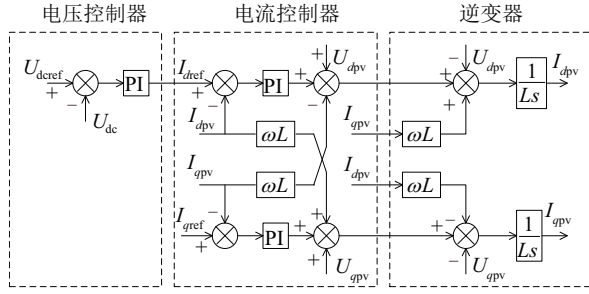


图2 光伏逆变器控制框图

Fig. 2 PV inverter control block diagram

对于单极式并网光伏系统的动态特性为:

$$\begin{cases} U_{dref} = U_m(1 - 0.00288\Delta T) \times \ln(e + 0.5\Delta S) \\ \frac{dx_1}{dt} = U_{dref} - U_{dc} \\ I_{dref} = K_{p1}(U_{dref} - U_{dc}) + K_{i1}x_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = I_{dref} - I_{qpv} \\ U_{dref} = K_{p2}(I_{dref} - I_{dpv}) + K_{i2}x_2 - \omega L I_{qpv} + U_{dpv} \\ I_{qref} = 0 \\ \frac{dx_3}{dt} = I_{qref} - I_{qpv} \\ U_{qref} = K_{p3}(I_{qref} - I_{qpv}) + K_{i3}x_3 - \omega L I_{qpv} + U_{qpv} \end{cases} \quad (1)$$

式中, e ——自然对数底数; S ——光照强度, W/m^2 ; x_1 、 x_2 、 x_3 ——中间变量; 其他变量的含义可参考文献[11]。

若忽略逆变器运行损耗,则由功率平衡可得光伏系统输出的功率等于直流滤波电容的增加功率与逆变器输出交流功率之和:

$$U_{dc} C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = U_{dc} I - U_{dpv} I_{dpv} \quad (2)$$

式中, U_{dc} ——电容电压, V; C_{dc} ——直流滤波电容, F; I ——光伏阵列输出电流, A。

2 光伏并入多机系统线性化建模

一个光伏电站并入 N 机电力系统如图 3 所示。前 $N-1$ 台机组采用同步发电机四阶模型,第 N 台为等值光伏电站,其网络方程为:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_g \\ \bar{I}_{pv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_m \\ \bar{U}_g \\ \bar{U}_{pv} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, \bar{I}_g 、 \bar{I}_{pv} ——电源输出电流相量矩阵; \bar{U}_g 、 \bar{U}_{pv} ——电源端电压相量矩阵; \bar{U}_m ——其他节点电压相量矩阵; \bar{Y}_{11} ——除电源外其他节点自导纳矩阵; \bar{Y}_{22} 、 \bar{Y}_{33} ——同步机和光伏电站节点自导纳矩阵,导纳矩阵

中的其余元素为不同节点间的互导纳矩阵。

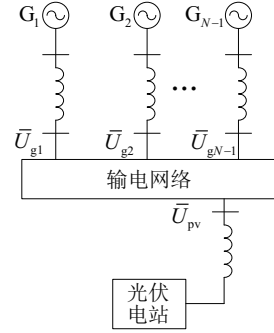


图3 光伏电站并入多机系统结构图

Fig. 3 Multi-machine system structure with photovoltaic power plant

消去式(3)中的 \bar{U}_m 可得:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_g \\ \bar{I}_{pv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} - \bar{Y}_{21}\bar{Y}_{11}^{-1}\bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{23} - \bar{Y}_{21}\bar{Y}_{11}^{-1}\bar{Y}_{13} \\ \bar{Y}_{32} - \bar{Y}_{31}\bar{Y}_{11}^{-1}\bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{33} - \bar{Y}_{31}\bar{Y}_{11}^{-1}\bar{Y}_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_g \\ \bar{U}_{pv} \end{bmatrix} = \bar{Y} \begin{bmatrix} \bar{U}_g \\ \bar{U}_{pv} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将上式由同步坐标系转换为旋转坐标系并在平衡点处线性化,可得到简化的同步发电机输出电流 d 、 q 轴分量矩阵表达式:

$$\begin{cases} \Delta I_d = A_d \Delta \delta + B_d \Delta E'_q + C_d \Delta I_{dpv} + D_d \Delta I_{qpv} \\ \Delta I_q = A_q \Delta \delta + B_q \Delta E'_q + C_q \Delta I_{dpv} + D_q \Delta I_{qpv} \end{cases} \quad (5)$$

式中, I_d 、 I_q ——同步发电机输出的 d 、 q 轴电流分量矩阵; I_{dpv} 、 I_{qpv} ——光伏电站输出的 d 、 q 轴电流分量矩阵; δ ——同步发电机相对于同步参考轴的角度矩阵; E'_q ——同步发电机暂态电动势 q 轴分量矩阵。

多机系统动的线性状态方程组的矩阵形式为^[12]:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \omega_0 I \Delta \omega \\ \Delta \dot{\omega} = M^{-1}(-\Delta P - \Delta \omega) \\ \Delta \dot{E}'_q = T'^{-1}_{d0}(-\Delta E_q + \Delta E'_{fd}) \\ \Delta \dot{E}'_{fd} = -T'^{-1}_A \Delta E'_q - T'^{-1}_A K_A \Delta U_g \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta P = I_{q0} \Delta E'_q + (U_{d0} - I_{q0} X'_d) \Delta I_d + (U_{q0} + I_{d0} X'_q) \Delta I_q \\ \Delta E_q = \Delta E'_q + (X_d - X'_d) \Delta I_d \\ \Delta U_g = U_{g0}^{-1} U_{gq0} \Delta E'_q - U_{g0}^{-1} U_{gd0} X'_d \Delta I_d + U_{g0}^{-1} U_{gq0} X'_q \Delta I_q \end{cases} \quad (7)$$

式中, ω ——同步机转速矩阵; P ——同步机输出功率矩阵; E_q ——同步机空载电动势矩阵; E'_{fd} ——自动励磁调节器输出电压矩阵; U_g ——同步机机端电压幅值矩阵。

由式(1)和式(2),式(5)~式(7)可得带光伏电站的多机系统线性化状态方程组,如式(8)所示:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x \\ \Delta x = [\Delta \delta \quad \Delta \omega \quad \Delta E'_q \quad \Delta E'_{fd} \quad \Delta x_1 \quad \Delta x_2 \quad \Delta x_3 \quad \Delta I_{dpv} \quad \Delta I_{qpv} \quad \Delta U_{dc}]^T \end{cases} \quad (8)$$

式(9)中 A 矩阵定义可参考文献[13],计算 A 矩阵特征值进行系统小干扰稳定性分析。为满足系统的振荡稳定性,所有的特征值应当位于复平面的左侧并具备充足的阻尼。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{28} & K_{29} & 0 \\ K_{31} & 0 & K_{33} & K_{34} & 0 & 0 & 0 & K_{38} & K_{39} & 0 \\ K_{41} & 0 & K_{43} & K_{44} & 0 & 0 & 0 & K_{48} & K_{49} & 0 \\ 0 & \cdots & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \vdots & \cdots & & & K_{65} & 0 & 0 & -1 & 0 & K_{610} \\ \vdots & \cdots & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \vdots & \cdots & & & K_{85} & K_{86} & 0 & K_{88} & 0 & K_{810} \\ \vdots & \cdots & & & 0 & 0 & K_{97} & 0 & K_{99} & 0 \\ K_{101} & \cdots & K_{103} & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{108} & K_{109} & K_{1010} \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 光伏并入多机系统模式分析

两区域系统如图 4 所示,作为分析光伏并网小干扰稳定性的算例。系统的结构参数见参考文献[14],在各区域有 2 台同步发电机组,均采用经典四阶模型。光伏采用第 2 节所述动态模型。

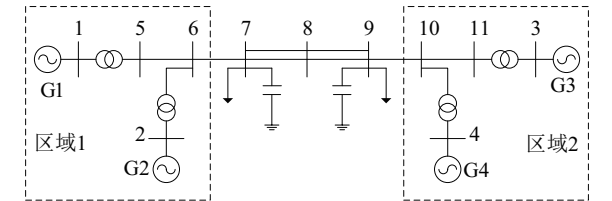


图4 两区四机系统
Fig. 4 Two-area four-generator system

模式分析用于研究电力系统小干扰稳定的步骤如下:

- 1)建立如式(8)所示线性化模型,计算状态矩阵 A 的特征值;
 - 2)检验特征值的虚部是否在 $2\pi f_0$ ($f_0=0.1\sim 2.0\text{ Hz}$) 的范围内,并通过计算机电回路相关比来辨识低频振荡模式;
 - 3)通过计算模式的参与因子来评估每一台发电机参与某一特定振荡模式的程度;
 - 4)通过模态分析来评估发电机是如何参与某一特定低频振荡的。
- 基本运行方式下(不含光伏电站)系统的低频振荡模式如表 1 所示。

表 1 两区四机系统低频振荡模式
Table 1 Two-area four-generator system low-frequency oscillation mode

模式	频率/Hz	阻尼比/%	参与因子			
			G1	G2	G3	G4
1	1.296	6.00	0.655	0.911	0.005	0.001
2	1.342	5.87	0.002	0.002	0.350	0.616
3	0.689	1.29	0.210	0.116	0.832	0.522

低频振荡模式的振型可由该模式的右特征向量中对应于 $\Delta\omega_i$ ($i=1,2,3,4$) 的分量确定,如表 2 所示。模式 1 的右特征向量对应于 $\Delta\omega_1$ 和 $\Delta\omega_2$ 分量的幅值远大于对应于 $\Delta\omega_3$ 和 $\Delta\omega_4$ 的分量,并且对应于 $\Delta\omega_1$ 和 $\Delta\omega_2$ 分量的方向相反,说明模式 1 表现为发电机 1 和发电机 2

之间的局部振荡;同理,模式 2 表现为发电机 3 和发电机 4 之间的局部振荡;模式 3 的右特征向量对应于 $\Delta\omega_1$ 和 $\Delta\omega_2$ 与 $\Delta\omega_3$ 和 $\Delta\omega_4$ 的分量幅值相近,方向相反,说明模式 3 表现为发电机 1 和发电机 2 与发电机 3 和发电机 4 区域之间的振荡。

表 2 两区四机域系统模态分析
Table 2 Two-area four-generator system modal analysis

模式	模态(幅值/角度)			
	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$
1	0.0058/58.19	0.0077/-120.19	0.0007/65.70	0.0007/-107.33
2	0.0003/-118.72	0.0001/-86.47	0.0040/59.08	0.0064/-118.27
3	0.0013/29.10	0.0010/23.50	0.0050/-112.62	0.0045/-112.09

分别在母线 6、母线 10 处接入容量为 100 MW 的光伏电站,并相应减少同步机 G2 和 G4 的有功出力以

保持功率平衡,采用模式分析法计算光伏电站不同接入位置对低频振荡模式的影响如表 3 所示。

表3 光伏接入不同位置低频振荡模式

Table 3 Photovoltaic access to different positions of low frequency oscillation mode

模式	母线6		母线10	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	1.266	6.12	1.293	5.91
2	1.337	6.01	1.305	6.24
3	0.684	2.07	0.680	1.48

由表3可看出:与表1基本运行方式相比,光伏电站并入多机系统后并没有产生新的振荡模式,而是对原有的低频振荡模式产生影响。光伏电站接入母线6后,局部和区间振荡模式阻尼比均有所提高。接入母线10后,局部模式1阻尼比有所下降,另外2个模式的阻尼比却有所提升。在母线6接入光伏电站更有利于阻尼的提升。

分别在母线6和母线10接入光伏电站并逐步增加其有功出力,相应减少同步机G2和G4有功出力以保持功率平衡,采用模式分析法计算光伏电站不同渗透率对低频振荡模式的影响,如图5所示。

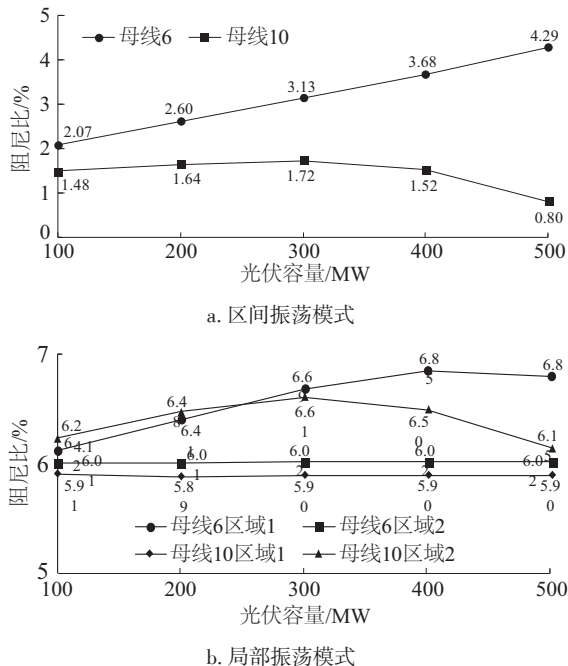


图5 光伏接入容量对振荡阻尼的影响

Fig. 5 Influence of PV access capacity on oscillation damping

由图5可看出:随着并网光伏容量的增加即光伏渗透率的提升,当光伏接入地点为母线6时,区间振荡模式的阻尼呈现上升趋势,区域1局部振荡模式的阻尼呈

现先上升后下降趋势,区域2局部振荡模式的阻尼基本保持不变;而当光伏接入地点为母线10时,区间振荡模式的阻尼呈现先上升后下降趋势,区域1局部振荡模式的阻尼基本保持不变,区域2局部振荡模式的阻尼呈现先上升后下降趋势。

综合上述分析,当光伏电站的接入位置和渗透率不同时,对系统阻尼的影响可能存在利弊两面。光伏并网不产生新的振荡模式,但随着光伏并网渗透率的提升,必然需要对电力系统低频振荡有抑制能力,本文参考传统PSS结构设计光伏电站附加阻尼控制器。

4 光伏综合功率调制控制器设计

在本文两区域测试系统的基础上,将600 MW的光伏电站接入母线10,并相应减少同步机G4的有功出力以保持有功平衡。在区域间联络线7-8中点设置三相短路故障,1 s时发生,1.1 s时故障清除。区域间联络线的有功响应如图6所示。可看出,接入光伏电站后系统的稳定水平降低了。在光伏电站安装FACTS或储能设备可有效抑制振荡^[15],然而设备的安装、运行以及维护成本则大大提高了。

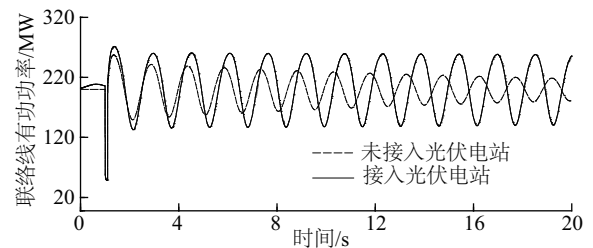


图6 联络线7-8有功响应

Fig. 6 Active response of line 7-8

光伏电站通过光伏逆变器与电网进行接口,逆变器通过双环控制策略实现了有功、无功功率解耦控制。图7为本文采用的基于综合功率调制的光伏广域控制结构。该结构是位于光伏电站内部的硬件结构,控制器的输入取自对区间模式可观性较好的广域信号,通常选取的信号包括:联络线有功功率、联络线有功电流、同步机转速差、同步机功角差等。本文选取联络线7-8有功功率作为控制器输入信号。将控制器的输出叠加至光伏有功/电压控制的电压参考值 U_{dref} 处实现有功调制,将输出叠加至无功/电压控制的电压参考值 U_{ref} 处实现无功调制,综合有功无功调制实现对区间低频振荡的有效抑制。

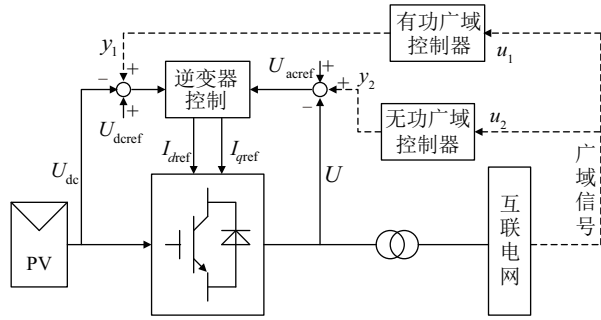


图7 光伏广域控制结构

Fig. 7 Photovoltaic wide area control structure

本文的有功广域控制器、无功广域控制器结构均采用如图8所示的类似于PSS的控制器结构,主要包括:量测环节、隔直环节、相位补偿环节、增益环节、限幅环节。

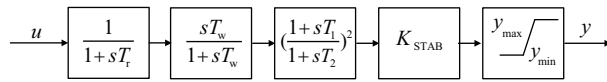


图8 光伏广域控制器结构

Fig. 8 Photovoltaic wide-area controller

图8中,量测环节传递函数为 $1/(1+sT_r)$, T_r 为时间常数;隔直环节传递函数为 $sT_w/(1+sT_w)$,其作用是隔离直流分量, T_w 一般取5~10 s;相位补偿一般采用超前滞后环节,其传递函数为 $[(1+sT_1)/(1+sT_2)]^2$,该环节的作用是相角补偿,使复平面上的极点向左半平面移动。单个环节的补偿角度一般不超过 60° ;增益环节 K_{STAB} 决定了控制器提供阻尼的大小;限幅环节用于限制控制器输出量,防止超过逆变器容量限制或者影响逆变器正常控制。

对于如图9所示控制系统,其闭环传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (10)$$

式中, $G(s)$ 、 $H(s)$ ——开环传递函数、控制器传递函数; $G_c(s)$ ——系统闭环传递函数,令 $G_c(s)$ 的极点为 λ ,满足 $1 + G(\lambda)H(\lambda) = 0$ 。可得:

$$H(\lambda) = -\frac{1}{G(\lambda)} \quad (11)$$

进一步有:

$$\begin{cases} |H(\lambda)| = \left| \frac{1}{G(\lambda)} \right| \\ \arg(H(\lambda)) = \pi - \arg(G(\lambda)) \end{cases} \quad (12)$$

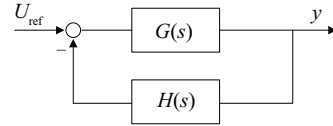


图9 反馈控制结构

Fig. 9 Feedback control structure

超前滞后环节参数可按相位补偿角度进行整定计算:

$$\begin{cases} \sin \theta = (1 - \alpha)/(1 + \alpha) \\ \alpha = T_2/T_1 \\ \omega = 1/\sqrt{\alpha}T_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中, θ ——需要补偿的相角, ($^\circ$); ω ——振荡频率, rad/s。

通过综合功率调制将区间模式对应的极点配置为 $-1.64 + j7.62$,对应的阻尼比为21.04%。按式(11)~式(13)整定控制器参数得到的控制器为:

$$H(s) = 1.17 \frac{10s}{1 + 10s} \times \frac{(1 + 0.42)^2}{(1 + 0.25s)^2} \quad (14)$$

为验证本文设计的附加阻尼控制器对区间振荡模式的抑制效果,在基本运行方式的基础上(光伏电站未接入),将100 MW附加阻尼控制器的光伏电站接入母线6并协调同步机G2有功出力以保证有功平衡。首先使用模式分析法得出无附加控制的区间振荡模式的阻尼比为2.07%,无功调制附加控制的阻尼比为11.25%,综合功率调制附加控制的阻尼比为21.04%,可看出有附加阻尼控制的光伏电站并入系统后的区间振荡模式阻尼比显著提升。最后,采用时域仿真法验证模式分析的正确性。设置的故障为:联络线7-8中点处在第1 s时发生持续0.1 s的三相短路。选取对区间模式可观性较强的信号作为观测量:联络线7-8单线传输功率;母线7电压。加入附加阻尼控制器前后的时域响应如图10、图11所示。

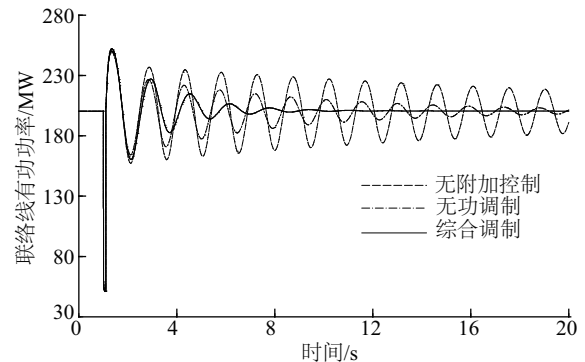


图10 联络线7-8有功响应曲线

Fig. 10 Active response of line 7-8

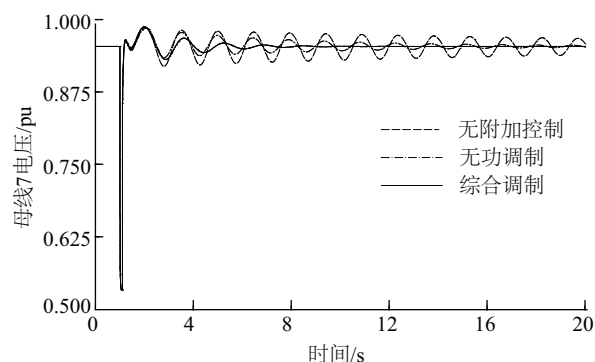


图 11 母线 7 电压响应曲线

Fig. 11 Voltage response of bus 7

可看出,在无附加控制器的情况下,联络线功率以及母线电压幅值均出现了较大幅度的振荡,并且衰减较为缓慢,在 20 s 时仍未平息。而接入光伏广域阻尼控制器后,联络线功率和母线电压幅值的振荡都能够较快的平息,区间模式阻尼明显提升,验证了模式分析的正确性。

5 结 论

随着电力系统中光伏渗透率的逐步增大,零惯量的光伏发电系统可能会对系统安全稳定运行带来负面影响。针对高渗透率光伏并网可能带来的系统弱阻尼低频振荡问题,研究光伏对系统振荡模态的影响以及设计附加阻尼控制器抑制低频振荡的具有重要意义。本文分析了不同场景下光伏并网对低频振荡的影响,研究通过光伏发电综合功率调制的方法抑制低频振荡的技术方案,主要结论如下:

1) 光伏并网不会产生新的振荡模式,光伏电站的不同接入位置和渗透率对系统阻尼的影响存在显著差异,系统阻尼呈现增大或减小的趋势。

2) 利用广域测量技术提取广域信号作为反馈控制器的输入,并通过调制综合功率抑制区间低频振荡,提高了光伏接入多机系统的电网稳定性。

[参考文献]

- [1] DING M, XU Z, WANG W, et al. A review on China's large-scale PV integration: Progress, challenges and recommendations [J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2016, 53: 639-652.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 2-14.
- DING M, WANG W S, WANG X L, et al. A review on

the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 2-14.

- [3] HUSSAIN M T, EL- AMIN I M. A PV controlled system for damping power system oscillations [C]// Innovative Smart Grid Technologies- Middle East, IEEE, 2012: 1-5.
- [4] SHAH R, MITHULANANTHAN N, SODE-YOME A, et al. Impact of large-scale PV penetration on power system oscillatory stability [C]//Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-7.
- [5] LIU H, JIN L, LE D, et al. Impact of high penetration of solar photovoltaic generation on power system small signal stability [C]//International Conference on Power System Technology, IEEE, 2010: 1-7.
- [6] 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): 106-116.
- [7] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 44-49.
- LONG Y, LI G J, CHENG L, et al. A study on damping power system oscillations based on photovoltaic system [J]. Power system technology, 2006, 30(24): 44-49.
- [8] 田华. 计及感应电动机负荷的光伏并网系统的小干扰稳定性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- TIAN H. Small signal stability analysis of PV system considering induction motor loads [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [9] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- SU J H, YU S J, ZHAO W, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cell [J]. Acta energiae solaris sinica, 2001, 22(4): 409-412.
- [10] 廖志凌, 阮新波. 任意光强和温度下的硅太阳能电池非线性工程简化数学模型[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 430-435.
- LIAO Z L, RUAN X B. Non-linear engineering simplification model of silicon solar cells in arbitrary solar radiation and temperature [J]. Acta energiae solaris sinica, 2009, 30(4): 430-435.
- [11] 熊连松, 刘小康, 卓放, 等. 光伏发电系统的小信号建模及其控制器参数的全局优化设计方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1234-1241.
- XIONG L S, LIU X K, ZHUO F, et al. Small-signal modeling of photovoltaic power generation system and global optimal design for its controller parameters [J].

- Power system technology, 2014, 38(5): 1234-1241.
- [12] 杜文娟, 王海风. 电力系统低频功率振荡模式分析理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- DU W J, WANG H F. Theory and method of low frequency power oscillation mode analysis in power system[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [13] 葛景, 都洪基, 赵大伟, 等. 光伏电站接入对多机电力系统低频振荡的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 63-70.
- GE J, DU H J, ZHAO D W, et al. Influences of grid connected photovoltaic power plants on low Frequency oscillation of multi machine power systems[J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(22): 63-70.
- [14] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [15] ENSLIN J H R. Dynamic reactive power and energy storage for integrating intermittent renewable energy [C]//Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010: 1-4.

INFLUENCE AND SUPPRESSION OF GRID-CONNECTED SOLAR POWER PLANTS ON LOW FREQUENCY OSCILLATION

Bai Fan, Wang Baohua

(School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Taking large-scale solar power plants into multi-machine power system as the research object, through the method of modal analysis and time domain analysis, firstly, the linear equations of the state equation of the multi-machine system is deduced, and then a four-generator two-area test system with solar power plants is set up. Research results indicate that different access points and different permeability of solar power plants can affect the low frequency oscillation of multi-machine systems, grid-connected solar power plants did not produce a new oscillation mode. The use of integrated power modulation design of the photovoltaic wide-area additional damping controller can suppress low-frequency oscillation.

Keywords: modal analysis; solar power plants; time domain analysis; low frequency oscillation; integrated power modulation; additional damping controller