

DOI: 10.7652/xjtuxb201502017

大规模光伏发电并网对互联电力系统 阻尼特性的影响及其阻尼控制策略

索江镭^{1,2}, 胡志坚^{1,2}, 刘宇凯^{1,2}, 张子泳^{1,2}

(1. 武汉大学电气工程学院, 430072, 武汉; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对未来大规模光伏发电系统并网对互联电力系统安全稳定性可能造成的影响,从系统阻尼特性角度展开详细研究。首先建立了适用于稳定分析的光伏发电系统的动态模型,然后搭建了含光伏发电系统的 IEEE16 机 68 节点测试系统,采用特征值分析法和模态分析法,研究了光伏发电的不同接入位置以及不同渗透率对互联电力系统阻尼特性造成的影响。结果表明:光伏发电系统不直接参与系统机电振荡,而主要通过对系统潮流的影响改变系统阻尼,并且由于阻尼控制环节的缺失可能对系统阻尼产生一定的负面影响;文中提出的光伏发电系统的阻尼控制策略可有效地抑制该负面影响,进一步提升了互联电力系统对光伏并网的接纳能力。

关键词: 光伏并网;光伏系统动态模型;特征值分析;阻尼特性;阻尼控制

中图分类号: TM71 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)02-0099-07

Influence of Large-Scale Photovoltaic System Integration on Damping Characteristics of Interconnected Grid and Damping Control

SUO Jianglei^{1,2}, HU Zhijian^{1,2}, LIU Yukai^{1,2}, ZHANG Ziyong^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The future large-scale photovoltaic integration into the grid would affect security and stability of interconnected power systems. Beginning with research on the system damping characteristics, a dynamic model of photovoltaic power system for stability analysis is established, and then the IEEE68 bus test system with PV is constructed. The eigenvalue analysis and modal analysis are adopted to investigate the influence on the damping characteristics of different access location and different penetrating of PV system. The results show that the photovoltaic power generation system is not directly involved in the electro-mechanical oscillations, but changes the system damping mainly by the impact on power flow, and exerts certain negative effects on the system damping for lack of damping control links. The proposed PV system damping control strategy enables to effectively inhibit the negative effects, and enhance the PV system adaptability of the interconnected power system.

Keywords: integration of large-scale photovoltaic into the grid; dynamic model of PV system; eigenvalue analysis; damping characteristics; damping control

收稿日期: 2014-07-21。 作者简介: 索江镭(1984—),男,博士生;胡志坚(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110141110032);西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室开放课题资助项目(EIPE13205)。

网络出版时间: 2014-12-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20141224.1606.001.html>

近年来,环境与能源问题受到了世界各国的广泛关注,高能耗的火电机组逐渐被风电、光伏等新型可再生能源技术取代已成为大势所趋^[1]。大规模清洁能源的利用改变了传统的以火电机组为主的能源结构,给互联电力系统带来了一定的影响,而随着能源产业结构的进一步升级,该影响更将不容忽视^[2]。

光伏发电是过去十年里发展较为迅猛的新能源技术之一,具有较高的年增长率,大规模光伏发电系统并网将是未来发展的重要趋势^[3]。因此,有必要从电网安全稳定运行角度,深入研究大规模光伏发电系统并网对互联电力系统的影响。对此,文献[4]从负载特性、电能质量、电网调度、电压无功、继电保护等方面简单分析了未来大规模光伏发电接入后对电网的影响。文献[5]指出,光伏发电的间歇性出力将造成电网的电压波动,无旋转惯性的特性将使电网的稳定裕度减少,输出功率的不确定性将造成电压闪变等问题。文献[6]指出,当光伏发电的高渗透率越高,短路阻抗将越低、欠电压保护整定值将越高、故障切除时间将更长。文献[7]从电力系统小干扰稳定角度,建立了光伏并网系统的小信号动态模型,并对控制参数的灵敏性进行了分析,通过合理选择控制参数来改善系统的小干扰稳定性。文献[8]对含光伏发电的单机-无穷大系统建立了 Heffron-Philips 模型,通过仿真得出高渗透率的光伏发电将对系统小干扰稳定造成负面的影响。

目前,关于大规模光伏发电并网对互联电力系统阻尼特性影响的文献偏少,研究还不够深入全面。鉴于此,本文提出了光伏并网系统的动态模型,并通过 IEEE-16 机 68 节点测试系统进行仿真试验,分别从不同接入位置、不同渗透率等方面展开研究,分析其产生影响的原因,并对可能使系统阻尼造成的负面影响提出解决方案,给未来大规模光伏发电并网下的互联电力系统安全稳定运行提供参考依据。

1 光伏发电系统动态模型

目前,光伏发电系统主要采用两级式结构,主要由光伏阵列、DC/DC 升压变换器、DC/AC 逆变器、控制系统等几个部分组成,如图 1 所示^[9]。

1.1 光伏阵列模型

光伏阵列是光伏发电的核心部分,它通过若干个由半导体制成的光伏电池组,将太阳能转化为电能,其等效电路如图 2 所示。

图 2 中 I_{PV} 和 V_{PV} 的表达式如下^[6]

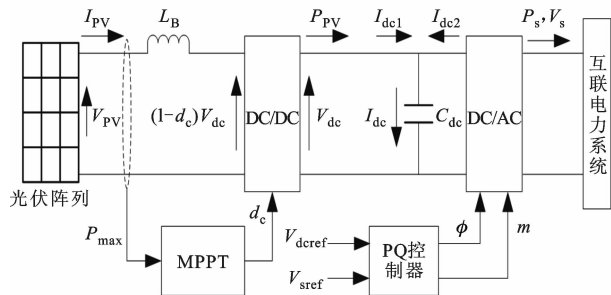
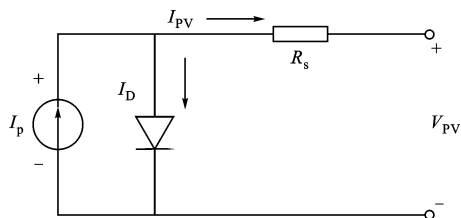


图 1 光伏并网发电系统结构示意图

$$I_{PV} = N_p I_p - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q V_{PV} + (I_p - I_D) q R_s}{n k T N_s} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$V_{PV} = \frac{N_s n k T}{q} \ln \left[\frac{N_p I_p - I_{PV}}{N_p I_0} + 1 \right] \quad (2)$$

式中: N_p 和 N_s 分别为光伏阵列中并联和串联的光伏电池数; I_0 为 PN 结的反向饱和电流; q 为电子电荷; n 为二极管因子; k 为波尔兹曼常数; T 为电池温度。



I_p 为光生电流; I_D 为二极管结电流; R_s 表示光伏电池板对电流的阻碍作用; I_{PV} 和 V_{PV} 分别为光伏阵列输出电流和输出电压

图 2 光伏电池的等效电路

1.2 DC/DC 升压变换器模型

由式(1)和式(2)可知,光伏电池受光照强度和电池温度的影响,导致系统工作点不确定,进而影响系统的输出功率。DC/DC 升压变换器在提高直流输出电压的同时,通过改变其功率开关管的占空比来控制并调整光伏电池工作在最大功率点,以实现最大功率跟踪(MPPT)。关于 MPPT 的实现方法,国内外已有大量文献进行了研究^[10],主要有:恒定电压法(CVT)、扰动观测法(P&O)、导纳增量法(IncCond)等等。由于本文主要研究的是光伏发电并网对系统阻尼特性的影响,因此对于不同的 MPPT 方法,统一采用如下的动态方程实现控制过程

$$\dot{d}_c = K_{PV}(s)(I_{PV}V_{PV} - P_{max}) \quad (3)$$

式中: $\dot{d}_c$ 为 MPPT 控制信号的占空比; $K_{PV}(s)$ 为 MPPT 控制器的传递函数; P_{max} 为最大功率点,可通过光伏阵列伏安特性曲线求得。DC/DC 升压变换器

形态特性、动态特性则可采用如下动态方程描述

$$\dot{I}_{PV} = \frac{1}{L_B} [V_{PV} - (1 - d_c)V_{dc}] \quad (4)$$

式中: L_B 为升压电感; V_{dc} 为 DC/DC 升压变换器输出电压。

1.3 DC/AC 逆变器模型

DC/AC 逆变器主要功能是将直流转化为交流, 以提供稳定的交流电并入电网。DC/AC 逆变器输出电压表达式如下

$$V_s = mkV_{dc}(\cos\theta + j\sin\theta) \quad (5)$$

式中: m 为无功控制输出信号; k 为 DC/AC 逆变器转换率; θ 为 DC/AC 逆变器功率因数角。DC/AC 逆变器输出电压、电流经过 dq 变换, 有

$$V_{dc}I_{dc2} = I_{sd}V_{sd} + I_{sq}V_{sq} \quad (6)$$

式中: V_{sd} 和 V_{sq} 、 I_{sd} 和 I_{sq} 分别为 DC/AC 逆变器输出电压、电流的 d 轴分量和 q 轴分量。

将式(5)带入式(6), 则有

$$V_{dc}I_{dc2} = I_{sd}mkV_{dc}\cos\theta + I_{sq}mkV_{dc}j\sin\theta \quad (7)$$

即

$$I_{dc2} = I_{sd}mk\cos\theta + I_{sq}mkj\sin\theta \quad (8)$$

又由

$$P_{PV} = I_{dc1}V_{dc} = (1 - d_c)V_{dc}I_{PV} \quad (9)$$

有

$$I_{dc1} = (1 - d_c)I_{PV} \quad (10)$$

式中: I_{dc1} 和 I_{dc2} 分别为 DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器流入直流支撑电容 C_{dc} 支路的电流分量, 如图 1 所示。因此, DC/AC 逆变器动态方程可由下式表示

$$\begin{aligned} \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{j\omega C_{dc}}(I_{dc1} + I_{dc2}) = \\ &= \frac{1}{j\omega C_{dc}}[I_{sd}mk\cos\theta + I_{sq}mkj\sin\theta + (1 - d_c)I_{PV}] \end{aligned} \quad (11)$$

1.4 控制系统模型

光伏发电控制系统主要包含 MPPT 控制系统与 PQ 控制系统两部分组成, 其中 MPPT 控制系统已在前文进行了分析, 动态方程如式(3)所示。 PQ 控制系统则是通过施加于 DC/AC 逆变器的有功控制信号 φ 与无功控制信号 m 完成光伏发电的有功无功解耦控制, 其动态方程如下

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = K_p(s)(V_{dc} - V_{dref}) \\ \dot{m} = K_q(s)(V_s - V_{sref}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $K_p(s)$ 和 $K_q(s)$ 分别为有功、无功控制器的传递函数; V_{dref} 和 V_{sref} 分别为 DC/DC 升压变换器输出电压和 DC/AC 逆变器输出电压的参考值。

因此, 式(3)、式(4)、式(11)和式(12)组成了光

伏发电系统的动态模型。

2 光伏并网对系统阻尼的影响

2.1 测试系统

本文选取 IEEE16 机 68 节点系统作为测试系统, 其中 16 台同步发电机采用经典 6 阶模型, 并全部安装本地电力系统稳定器(PSS), 系统负荷全部采用恒阻抗模型(详细参数见文献[11]), 如图 3 所示, 本文测试平台基于 MATLAB/Simulink。

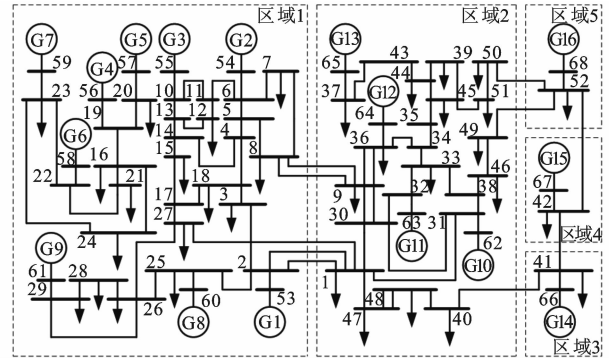


图3 IEEE 16 机 68 节点系统单线图

在该系统中, 区域 1 为新英格兰系统, 区域 2 为纽约系统, 区域 3~5 为相邻区域等值发电机。G13 和 G16 承担了系统主要电力供应, 其容量分别为 12 GW 和 11 GW, 其有功出力分别为 3.5 GW 和 4 GW。纽约系统为重负荷区域, 其负荷总额为 8.45 GW, 但该区域发电总额仅为 6.28 GW, 因此需通过相邻区域的远距离输电以填补此区域的有功缺额。

2.2 光伏发电不同接入位置对系统阻尼特性的影响

为研究光伏发电不同接入位置对系统阻尼特性的影响, 本文分别将测试系统中容量最大的同步发电机 G13 与 G16 用等容量的光伏发电系统替代, 替代前后的系统小干扰计算结果分别如表 1 和表 2 所示。

由表 1 和表 2 对比可知, 光伏发电系统并网后对系统振荡频率的影响远小于对系统阻尼的影响。具体而言, 当光伏发电系统替代同步发电机 G13 时, 模式 1、模式 3 的阻尼有着显著提升, 而模式 8、模式 9 和模式 15 的阻尼有小幅改善, 其他模式则变化不大。当光伏发电系统替代同步发电机 G16 时, 模式 1、模式 3、模式 4 的阻尼有不同程度的下降, 其中模式 4 阻尼下降最为明显, 而其他模式变化不大。

图 4 为原系统发电机功角在模式 1、模式 4、模式 15 情况下的参与因子。由图可知, 同步发电机 G13 在模式 1 的参与因子相对于其他模式较高, 同

表 1 原系统低频振荡模式分析

模式类型	模式	特征值	振荡频率/ Hz	阻尼比/ %
区域模式	1	$-0.181 \pm j2.349$	0.37	7.68
	2	$-0.143 \pm j3.279$	0.52	4.36
	3	$-0.267 \pm j4.104$	0.65	6.49
	4	$-0.240 \pm j4.986$	0.79	4.81
本地模式	5	$-0.817 \pm j6.727$	1.07	12.06
	6	$-0.723 \pm j6.963$	1.11	10.33
	7	$-1.462 \pm j7.278$	1.16	18.59
	8	$-0.858 \pm j7.492$	1.19	11.38
	9	$-0.803 \pm j8.083$	1.29	9.89
	10	$-1.177 \pm j8.374$	1.33	13.92
	11	$-2.120 \pm j9.065$	1.44	22.77
	12	$-2.320 \pm j9.442$	1.50	23.86
	13	$-2.740 \pm j10.11$	1.61	26.16
	14	$-2.084 \pm j11.22$	1.79	18.26
	15	$-1.698 \pm j11.67$	1.86	14.40

表 2 光伏接入后系统振荡模式分析

模式类型	模式	替代 G13		替代 G16	
		频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
区域模式	1	0.36	8.53	0.39	5.95
	2	0.51	4.39		
	3	0.65	7.61	0.66	5.21
	4	0.77	4.80	0.81	1.17
本地模式	5	1.07	12.06	1.07	12.05
	6	1.11	10.33	1.12	10.31
	7	1.16	18.60	1.16	18.59
	8	1.19	11.41	1.19	11.38
	9	1.29	9.93	1.29	9.90
	10	1.32	13.92	1.33	13.92
	11			1.44	22.77
	12	1.50	23.86	1.51	23.86
	13	1.61	26.16	1.60	26.16
	14	1.79	18.26	1.79	18.26
	15	1.87	14.45	1.86	14.39

步发电机 G16 在模式 4 的参与因子相对其他模式较高,这就解释了光伏发电系统对不同振荡模式影响大小的原因:光伏发电系统所替代的同步发电机在某模式下的参与因子越大,则该模式受光伏发电系统并网的影响则越大。仿真结果表明,该影响有可能是正面的,也可能是负面的。

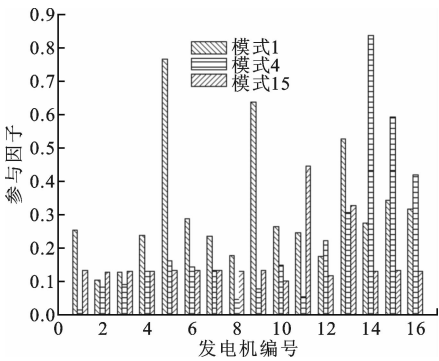


图 4 部分模式下参与因子的变化

值得注意的是:由表 1 和表 2 对比发现,当光伏发电系统替代某台同步发电机时,系统振荡模式减少了一组。这表明光伏发电系统并不直接参与系统振荡,而这一组模式的减少是由同步发电机的退出而造成的。

图 5 列举了当同步发电机 G16 被光伏发电系

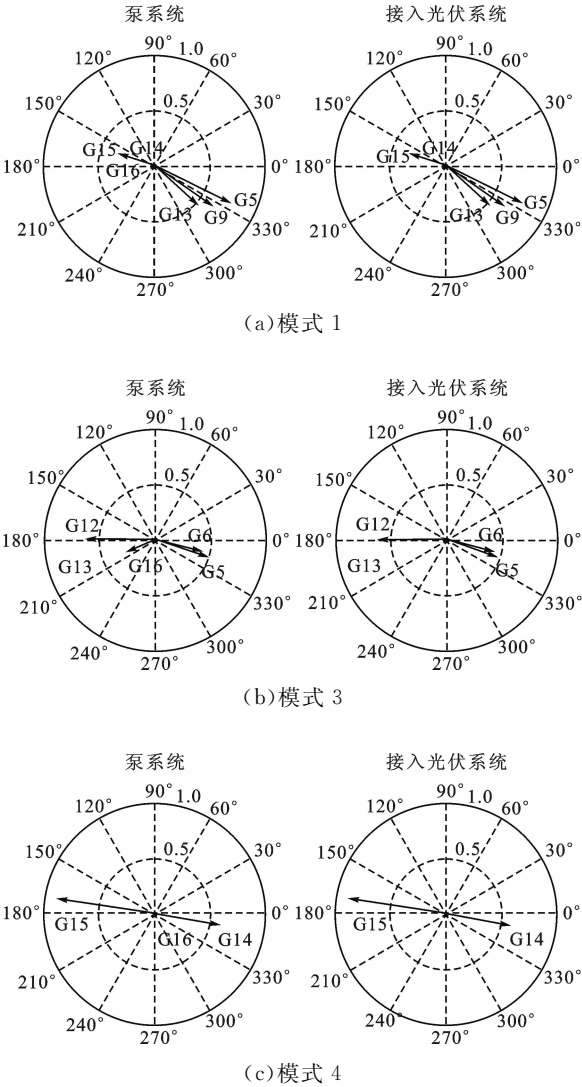


图 5 光伏接入对系统振荡模式的影响分析

统替代前后的系统部分振荡模态图。为使分析更为直观,图 5 中仅显示了模值较大的模态。通过对图 5 的分析可知,当光伏发电系统替代同步发电机后,系统的振荡模态并无明显变化,这进一步表明了光伏发电系统不直接参与系统机电振荡,也不改变系统原有的振荡模态。

2.3 光伏发电渗透率对系统阻尼特性的影响

通过上文分析可知,不同光伏发电系统接入位置对系统阻尼的影响不同,因此本文以接入位置节点 65 和节点 68 为例,分别取光伏渗透率为 0%、5%、10%、15%、20%进行计算,系统关键模式的阻尼计算结果如图 6 所示。

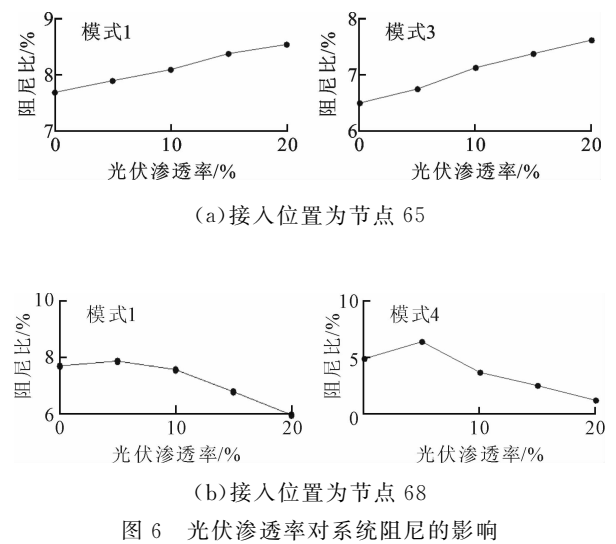


图 6 光伏渗透率对系统阻尼的影响

图 6 列举了光伏发电系统在不同渗透率下变化较大的部分模式。从中可以发现,当光伏发电的接入位置不同时,随着光伏渗透率的提高,对系统阻尼的正面影响或者负面影响将呈增大的趋势。

2.4 接入光伏对系统阻尼特性影响的机理研究

通过上述分析可知,当光伏发电代替传统同步发电机时,对系统阻尼的影响有可能是正面的,也可能是负面的。由上文分析可知,光伏发电系统不直接参与系统机电振荡,因此其对系统阻尼的负面影响主要来源于其本身不具类似于同步发电机 PSS 的阻尼控制环节,而当其替代了安装有 PSS 的同步发电机时,造成了系统阻尼出现一定程度的下降。

为研究光伏发电系统对系统阻尼特性的影响机理,在最大功率点处,将容量为 10 MW 的光伏发电动态模型和相同输出功率的恒功率静态模型接入测试系统的节点 9 与节点 1,系统关键振荡模式计算结果如表 3 所示。

表 3 不同光伏模型接入后系统振荡模式分析

光伏模型	模式	节点 9		节点 1	
		频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
动态模型	1	0.38	12.47	0.37	10.66
	2	0.52	5.29	0.51	5.18
	3	0.62	15.33	0.65	13.47
	4	0.80	7.61	0.78	9.91
静态模型	1	0.38	12.52	0.36	10.63
	2	0.51	5.33	0.51	5.20
	3	0.62	15.28	0.66	13.47
	4	0.79	7.64	0.78	9.92

由表 3 可知,光伏发电系统采用动态模型和静态模型对系统关键模式并没有太大影响,这也进一步验证了光伏发电不直接参与系统机电振荡。接入光伏发电对系统的阻尼可能造成一定的正面影响,由于光伏发电对系统关键模式的影响很小,因此这种情况并不来源于光伏发电系统本身与相关同步发电机阻尼转矩的相互作用,而是接入光伏发电改变了系统平衡点,进而引起系统潮流的变化,使得在某些情况下对系统的阻尼呈现出提升的现象。当这种影响超过了光伏发电系统因阻尼控制环节的缺失而引起的负面影响,会使得系统阻尼在某些情况下呈现上升趋势。

3 光伏发电系统的阻尼控制研究

由于受光照强度、占地面积等因素的影响,大规模光伏发电基地往往远离负荷中心,需通过长距离输电线路进行远距离消纳。由上文分析可知,高渗透率光伏发电接入电力系统后,由于缺乏类似于同步发电机 PSS 等设备,因此难以对光伏发电系统进行阻尼控制,可能会对系统阻尼造成一定的负面影响,这给系统安全稳定水平带来了一定的隐患,增加了系统发生低频振荡的危险。

以本文测试系统为例,光伏发电系统接入节点 68,替代同步发电机 G16 向区域 2 进行远距离送电。当区域 2 中输电线路 1-30 末端在 0.1 s 发生三相短路故障,在 0.2 s 时该故障清除,则区域联络线 52-50 的有功响应如图 7 所示。

由图 7 可知,接入光伏发电后降低了系统的稳定水平。目前常用的办法是在光伏发电基地安装柔性交流输电系统或者储能设备^[12],这无疑大幅增加了安装、运行以及维护成本。考虑到目前广域测量

系统在电力系统的广泛应用,本文将精密测量单元所采集的系统重要数据通过反馈控制环节引入光伏发电的有功控制系统,这给光伏发电系统的阻尼控制提供了一个新的思路。

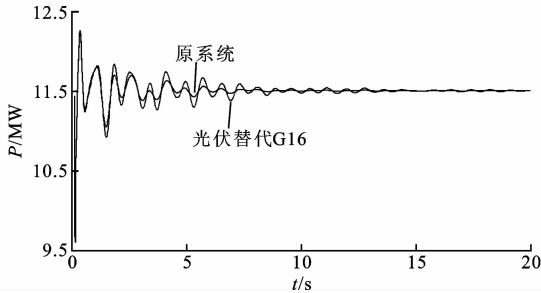


图 7 光伏接入前后联络线 52-50 有功响应

图 8 为本文提出的光伏发电系统阻尼控制策略,该策略在不改变原光伏发电系统 PQ 解耦控制的基础上,在有功控制信号电压参考值处引入一个反馈控制环节,以实现光伏发电系统的阻尼控制。

图 9 为光伏逆变器存在的 3 种结构形式。采用图 9a 所示的逆变器结构虽控制灵活方便,但在实际运行当中会造成一定的电能质量问题,因此目前光伏并网大多采用如图 9b 所示的逆变器结构,而图 9c 融合了低成本与高质量的电能输出的优点,因此成为了未来并网逆变器结构的发展趋势。图 8 所采用的控制策略仅针对图 9a 和图 9c 两种光伏逆变器结构所设计。对于图 9b 型结构光伏逆变器,仍可采用如图 8 所示的控制结构,在设计过程中,需考虑到不同控制器之间的参数协调问题,其设计方法与同步发电机之间 PSS 协调控制设计方法类似,可参考相关文献[13],本文不再赘述。对于图 9a 和 9c 两种光伏逆变器结构,其阻尼控制器设计方法如下:首先选取联络线 52-50 的有功功率作为控制器输入,控制器输出则附加在如图 8 所示的光伏发电有功控制环上。

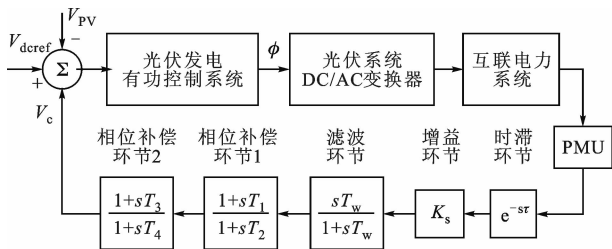
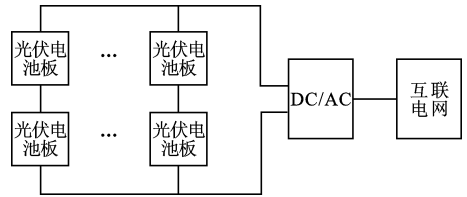
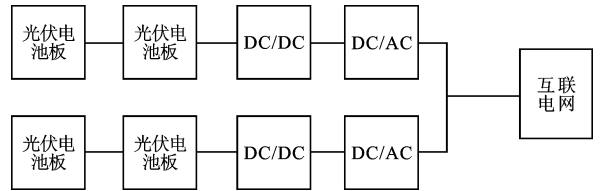


图 8 光伏发电系统阻尼控制策略

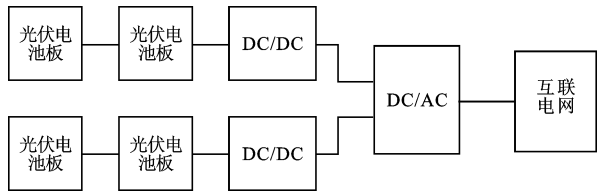
根据电力系统低频振荡基本特性,系统阻尼比越大,其受扰后振荡衰减到稳态所需的次数越少,即系统动态性能越好。因此,在对光伏发电系统加入



(a)集中型



(b)串级型



(c)混合型

图 9 光伏并网逆变器结构

如图 8 所示的阻尼控制环节后,应使系统中存在的较小阻尼比提升至稳定范围,故控制器参数可采用下式确定

$$\begin{aligned} \max \quad & f = \min\{\xi\} \\ \text{s. t.} \quad & K_s^{\min} \leq K_s \leq K_s^{\max} \\ & T_j^{\min} \leq T_j \leq T_j^{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ξ 为系统振荡模式中较小的阻尼比(本文取 $< 15\%$); T_j 为相位补偿时间常数($j=1, 2, 3, 4$); K_s 为控制器增益系数。本文取隔直时间常数 T_w 为 10 s,时滞环节则采用如下二阶 Pade 近似方法进行处理(本文取时滞 $T_d=100$ ms)^[14]

$$e^{-s} = \frac{1 - 0.5sT_d}{1 + 0.5sT_d} \quad (14)$$

对于上述优化问题,本文采用标准粒子群算法(PSO),计算得到 $k_s = 2.603$, $T_1 = 43.782$, $T_2 = 4.018$, $T_3 = 6.944$, $T_4 = 0.236$ 。

图 10 为采用本文控制策略前后,区域联络线 52-50 在与图 7 相同故障下的有功响应。该图表明,采用本文控制策略能有效实现光伏发电系统阻尼控制,这降低了光伏并网对系统安全稳定水平可能带来的负面影响,提高了互联电力系统对光伏发电系统的接纳能力。

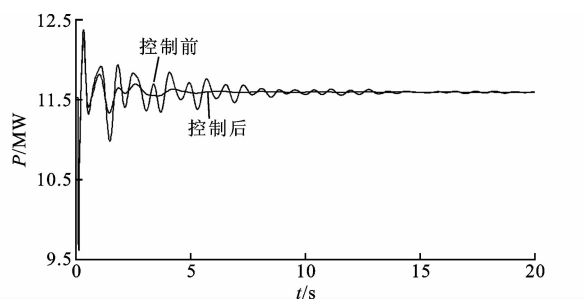


图10 光伏发电系统阻尼控制效果对比

4 结 论

(1)大规模光伏发电系统并网后,会对系统阻尼特性造成一定的影响,其中对系统振荡频率的影响远小于对系统相关模式阻尼比的影响,并且所替代的同步发电机在某模式下的参与因子越大,该模式所受的影响则越大。

(2)光伏发电接入系统因接入位置的不同,随着渗透率的提升,系统阻尼呈现增大或者减小的趋势,其正面影响主要原因来源于光伏发电系统对潮流的改变,其负面影响主要来源于光伏发电系统缺乏类似于同步发电机 PSS 的阻尼控制环节。

(3)大规模光伏发电系统并网虽然对系统阻尼特性有一定影响,但并不直接参与同步发电机直接的机电振荡,并且在光伏发电并网前后不改变原有同步发电机之间的振荡模态。

(4)利用 WAMS 信号,将系统重要数据通过反馈控制环节引入光伏发电的有功控制系统是提高光伏发电系统阻尼的有效办法,降低了光伏并网对系统安全稳定水平可能带来的负面影响,提高了互联电力系统对光伏发电系统的接纳能力。

致谢:本文得到了西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室的资助(EIPE13205),特此表示感谢!

参考文献:

- [1] SHEA J J. Clean electricity from photovoltaics [M]. London, UK: Imperial College Press, 2001: 46-51
- [2] ELTAWIL M A, ZHAO Z. Grid-connected photovoltaic power systems: technical and potential problems: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 112-129.
- [3] YANG B, LI W, ZHAO Y, et al. Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(4): 992-1000.

- [4] 赵平, 严玉廷. 并网光伏发电系统对电网影响的研究 [J]. 电气技术, 2009, 3(4): 41-44.
ZHAO Ping, YAN Yuting. Research on effect of grid-connected photovoltaic system on power grid [J]. Electrical Technology, 2009, 3(4): 41-44.
- [5] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101-107.
ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.
- [6] ACHILLES S, SCHRAMM S, BEBIC J. Transmission system performance analysis for high-penetration photovoltaics [M]. New York, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2008: 31-32.
- [7] 周林, 李怀花, 张林强, 等. 光伏并网系统小信号动态建模及控制参数灵敏度分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 1-5.
ZHOU Lin, LI Huaihua, ZHANG Linqiang, et al. Small-signal dynamic modeling of grid-connected PV system and eigenvalue sensitivity analysis of the controller parameters [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 1-5.
- [8] DU W, WANG H, XIAO L Y. Power system small-signal stability as affected by grid-connected photovoltaic generation [J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(5): 688-703.
- [9] TAN Y T, KIRSCHEN D S, JENKINS N. A model of PV generation suitable for stability analysis [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 748-755.
- [10] 杨文杰. 光伏发电并网与微电网运行控制仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [11] ROGERS G. Power system oscillations [M]. Boston, USA: Kluwer Academic, 2000: 61-63.
- [12] ENSLIN J H R. Dynamic reactive power and energy storage for integrating intermittent renewable energy [C]// 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-4.
- [13] PANDA S. Robust coordinated design of multiple and MULTI-type damping controller using differential evolution algorithm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(4): 1018-1030.
- [14] HASHMANI A A, ERLICH I. Delayed-input power system stabilizer using supplementary remote signals [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(8): 893-899.

(编辑 杜秀杰)