

适用于低频振荡分析的电力电子接口电源模型研究

陈喜峰¹,任玮蒙²,武 侠³

(1. 国网河南省电力公司许昌供电公司,河南 许昌 461000;2. 国网安徽省电力有限公司合肥供电公司,安徽 合肥 230601;
3. 国网山东省电力公司烟台供电公司,山东 烟台 264000)

摘 要:通过对三相逆变电路进行建模及模型降阶,提出适用于低频振荡分析的2阶电力电子接口电源模型,在接入电力电子接口电源的四机两区域系统中进行特征根分析,并将分析结果与高阶模型的结果进行对比,验证该文所提模型的有效性。基于此模型,对电力电子接口电源容量对区间振荡及本地振荡的振荡频率及阻尼比的影响进行分析,结果表明:随着电力电子接口电源容量的增加,区间振荡和本地振荡的振荡频率均会升高,阻尼比也增加。最后,基于降阶模型对电力电子接口电源的下垂控制器的增益进行整定,并通过电力电子接口电源的高阶模型进行仿真,对整定参数进行验证,仿真结果进一步验证了所提降阶模型的正确性。

关 键 词:电力电子接口电源;低频振荡;奇异摄动理论;模型降阶;下垂控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.008 中图分类号:TM464 文章编号:1673-9140(2020)06-0061-07

Research on power supply model with a power electronic interface for low frequency oscillation analysis

CHEN Xifeng¹, REN Weimeng², WU Xia³

(1. Xuchang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Xuchang 461000, China; 2. Hefei Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China; 3. Yantai Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Yantai 264000, China)

Abstract: By modeling the three-phase inverter circuit and reducing the model order, a second-order power supply model with power electronic interfaces is proposed for the low-frequency oscillation analysis. Firstly, the eigenvalue analysis is performed in a four-machine two-region system including power electronic interface power supply. Then, the results of the analysis are compared with those of higher-order models to verify the validity of the proposed model. In addition, based on this model, this paper also analyzes the influence of power electronic interface power supply capacity on the oscillation frequency and damping ratio of interval and local oscillation. The analysis results show that as the capacity of power electronic interface power supply increases, the oscillation frequency of interval oscillation and local oscillation would increase. The damping ratio also increases. Finally, based on the reduced-order model, the

收稿日期:2018-06-23;修回日期:2018-08-29

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2042017kf0040)

通信作者:陈喜峰(1975-),男,硕士,主要从事电力系统生产管理及分析技术研究;E-mail:chenxifeng123@163.com

droop controller gain for the power supply of power electronic interface is adjusted, and the higher-order model of the power electronic interface power supply is used to simulate the setting parameters. The simulation results further verify the validity of the reduction order model proposed in this paper.

Key words: power electronics interface power supply; low frequency oscillation; model reduction; droop control

可再生能源常常通过电力电子接口并入电网,随着可再生能源规模的不断扩大,其对电力系统的特性将产生重要影响^[1]。经过几十年的发展,传统交流电力系统的低频振荡(low frequency oscillation, LFO)研究取得了丰富的成果,然而,电力电子接口电源对低频振荡的影响仍然值得进一步研究^[2]。

目前,已有文献的分析方法主要集中于将高阶电力电子接口电源模型接入传统交流电力系统模型,以此来分析电力电子接口电源对低频振荡的影响。文献[3]基于详细的双馈风机模型分析了其对电力系统低频振荡的影响;文献[4]详细推导并建立了含光伏电站的多机系统状态方程及其线性化模型,并基于此研究光伏电站接入对多机电力系统低频振荡的影响;文献[5]在仿真软件 DigSilent 中,将风机和光伏接入三机九节点系统,以此来研究可再生能源渗透率对电力系统低频振荡的影响。

传统同步机的模型阶数包括 2~7 阶^[6],当研究不同问题时可以选用不同阶数的模型以减少分析和计算的复杂度,然而关于电力电子接口电源适用于低频振荡分析的模型研究却少有报道。文献[7-8]在低频振荡分析中都将电力电子接口电源简单地等效为一个恒功率注入源,但是这种简化模型的适用性还没有得到充分讨论。

因此,目前电力电子接口电源在低频振荡中的分析模型尚值得进一步研究,已有研究或使用高阶模型或使用恒功率模型,使得模型过于复杂或过于简化,该文的目的在于研究适用于低频振荡分析的电力电子接口电源模型。

另一方面,电力电子接口电源的降阶模型在整定控制器参数时更加方便。文献[9-11]基于高阶电力电子装置模型研究了电力电子接口电源阻尼控制的作用,该文将基于降阶模型对电力电子接口电源下垂控制器的增益参数进行整定,并通过高阶模型来验证参数的正确性,从而进一步验证降阶模型的有效性。

该文首先通过对三相逆变电路进行建模及模型降阶,提出适用于低频振荡分析的 2 阶电力电子接口电源模型,在接入电力电子接口电源的四机两区域系统中进行特征根分析,并将分析结果与高阶模型的结果进行对比。基于此模型,该文还分析电力电子接口电源容量对区间振荡及本地振荡的振荡频率及阻尼比的影响。最后,该文还基于降阶模型对电力电子接口电源的下垂控制器的增益进行整定,并通过电力电子接口电源的高阶模型进行仿真来对整定参数进行验证。

1 电力电子接口电源高阶模型

可再生能源常通过一个三相逆变电路接入电网,如图 1 所示。这个三相逆变电路采用定直流电压控制,将直流电压误差及无功指令值作为输入即可获得三相逆变器所需 PWM 波形,为了减少输入电网的谐波,三相逆变器与电网之间常常还通过 LCL 滤波器连接,该文将基于图 1 建立这类电力电子接口电源的高阶模型。

1) 直流功率传递方程。忽略直流侧动态过程,仅考虑直流电容动态过程,可以得到:

$$C_d \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{P_{dc} - P_{inv}}{u_{dc}} \quad (1)$$

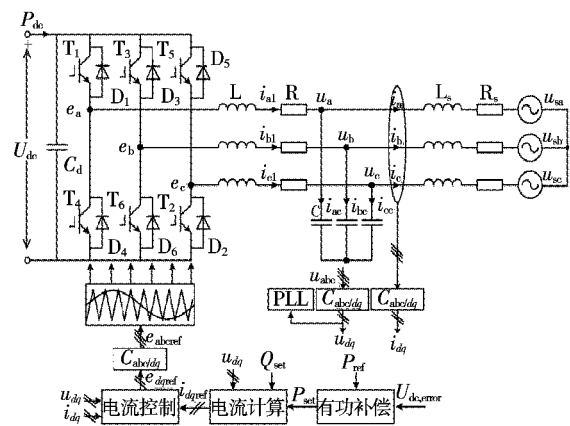


图 1 电力电子接口电源

Figure 1 Power electronics interface power supply

$$u_{dc,error} = u_{dc} - u_{dc,set} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 C_d 为直流侧电容; u_{dc} 为直流电压; P_{dc} 为直流侧注入功率; P_{inv} 为逆变器输入功率; $u_{dc,set}$ 为直流电压指令值; $u_{dc,error}$ 为直流电压误差。

2)有功补偿方程。逆变器外环控制器采用定直流电压控制,其动态方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = u_{dc,error} \\ P_{set} = P_{ref} + K_{pi}x_1 + K_{pp}u_{dc,error} \end{cases} \quad (3)$$

式中 x_1 为外环 PI 环节中积分器的输出; K_{pp} 为比例系数; K_{pi} 为积分系数; P_{ref} 为有功参考值。

3)电流计算方程。标幺值下系统的有功和无功为

$$\begin{cases} P = u_d i_d + u_q i_q \\ Q = u_q i_d - u_d i_q \end{cases} \quad (4)$$

式中 u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 d - q 轴下的电压和电流。也可以根据公式计算出电流环的指令值,即

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{(P_{set} u_d + Q_{set} u_q)}{u_{abs}} \\ i_{qref} = \frac{(P_{set} u_q - Q_{set} u_d)}{u_{abs}} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{abs} = u_d^2 + u_q^2 \quad (6)$$

式(5)、(6)中 i_{dref} 、 i_{qref} 分别为电流环的输入参考值; u_{abs} 为电压幅值。

4)电流控制方程。电流内环动态方程为

$$\begin{cases} e_{dref} = u_d - \omega L i_q + K_{cp}(i_{dref} - i_d) + K_{ci}x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = i_{dref} - i_d \\ e_{qref} = u_q + \omega L i_d + K_{cp}(i_{qref} - i_q) + K_{ci}x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = i_{qref} - i_q \end{cases} \quad (7)$$

式中 ω 为系统角频率; K_{cp} 、 K_{ci} 分别为电流环 PI 中的比例、积分系数; x_2 、 x_3 分别为 d - q 轴积分器的输出。

5)锁相环(phase locked loop, PLL)方程。逆变器通过 PLL 跟踪电网电压,其动态方程为

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = K_{PLLp}u_q + K_{PLLl}x_4 \\ \frac{dx_4}{dt} = u_q \end{cases} \quad (8)$$

式中 θ 为锁相环的输出角度; x_4 为锁相环中积分器的输出; K_{PLLp} 、 K_{PLLl} 分别为 PI 环节中的比例、积

分系数。

6)坐标系转换方程^[12]。逆变器中包含系统、控制器 2 个坐标系。2 个坐标系中变量的转换关系为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{dref} \\ e_{qref} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

式中 用下标 d 、 q 代表控制器坐标系,用下标 x 、 y 代表系统坐标系。2 个坐标系的转换通过 PLL 实现,PLL 对逆变器的动态特性有重要影响,该文仅考虑 PLL 能迅速跟踪电网相位的情形,因此,锁相环参数为 $K_{PLLp}=1800$, $K_{PLLl}=2000$ 。

7)交流电路方程。LCL 滤波器的动态方程为

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{y1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{y1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{y1} \end{bmatrix} \\ C \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{y1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega C \\ -\omega C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \\ L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \end{bmatrix} - R_s \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L_s \\ -\omega L_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

式中 L_s 、 R_s 分别为靠近电网侧的电感、电阻; C 为滤波器电容; L 、 R 分别为逆变器的电感、电阻。

8)频率下垂控制。为了增加系统等效惯量或者一次调频能力,一些措施如频率下垂控制或者虚拟同步技术得到了广泛的研究,而这些措施也被认为在一定程度上是等效的^[12-15],同时这些措施还被用来阻尼系统振荡^[9],该文将基于降阶模型对下垂控制器增益参数 K_s 进行整定。频率下垂控制的框图如图 2 所示,其结构类似于电力系统稳定器,输入为

交流母线的角频率,其输出附加在逆变器原来的直流功率上,附加的这部分功率常常来自储能,包括转子储能及其他储能等。

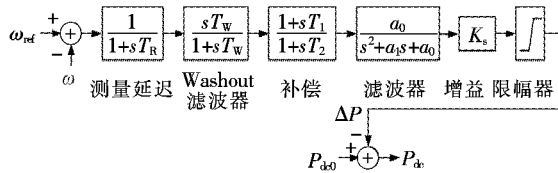


图2 频率下垂控制

Figure 2 Frequency droop control diagram

2 基于奇异摄动理论的模型降阶

传统交流电力系统的低频振荡中常常忽略输电网络的快动态过程,而电力电子接口电源模型中也存在电流环和滤波器等快动态过程^[12],在分析低频振荡时,完全可以将这些快动态过程忽略。因此,该文分析2种降阶模型:保留直流电容动态过程和直流电压控制动态过程的2阶模型(简称为2阶模型)及恒功率模型在低频振荡分析中的适用性。

2.1 模型降阶

根据奇异摄动理论,可以将代表慢动态过程的微分方程保留,而将其他快动态过程降阶,即令方程左边的微分项等于零,将微分方程变为代数方程。根据已有文献,三相逆变电路中的电流内环和滤波器动态过程等通常远快于控制器外环动态过程^[12],因此可以得到三相逆变电路的2阶模型,即保留式(1)、(3)左边的微分项,令式(7)、(8)、(10)左边的微分项等于零,2阶模型仅包含2个状态变量: u_{dc} 和 x_1 。结合式(1)~(10)即可建立三相逆变器的详细数学模型,2阶电力电子接口电源模型动态方程为

$$\begin{cases} C_d \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{P_{dc} - P_{inv}}{u_{dc}} \\ \frac{dx_1}{dt} = u_{dc} - u_{dc, set} \\ i_d = \frac{P_{ref} + K_{pi}x_1 + K_{pp}(u_{dc} - u_{dc, set})}{u_d} \\ i_q = \frac{-Q_{set}}{u_d} \end{cases} \quad (11)$$

恒功率模型认为电力电子接口电源在低频振荡的动态过程中保持为恒功率特性,其功率可通过直

流输入功率计算得到。画出不同模型从直流输入功率到三相逆变器输出功率的传递函数的波特图,如图3所示,可以发现2阶模型在0~10 Hz与全阶模型吻合较好,而恒功率模型的相位特性从1 Hz开始与全阶模型产生一定的差异,因此在低频振荡分析中,2阶模型可以较好地代替全阶模型,减少计算复杂量,而又比恒功率模型提供更高的精度。

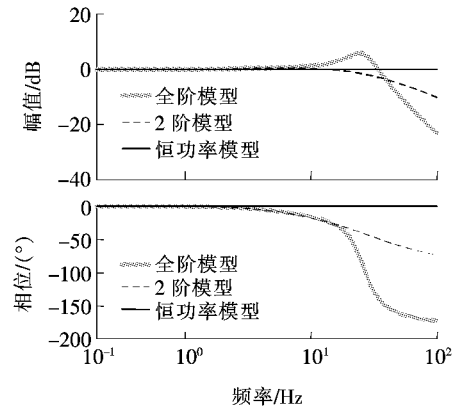


图3 不同阶数模型的波特图

Figure 3 Bode plots drawn by different models

2.2 降阶模型的验证

四机两区域系统常被用于研究低频振荡,其参数见文献[6]。2个电力电子接口电源被添加在四机两区域系统中,如图4所示,通过计算修改后的系统的特征根来验证该文所提2阶模型的准确性。

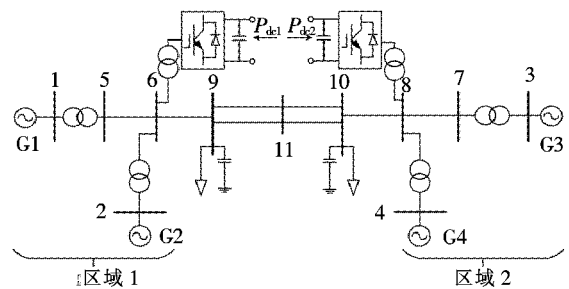


图4 修改的四机两区域系统

Figure 4 Modified four-machine two-area system

未添加电力电子接口电源时的发电机($G_1 \sim G_4$)出力分别为700、700、723.36、700 MW。母线9、10上的负荷分别为959 MW、212 MVar和1775 MW、288 MVar。在母线6、8上加入电力电子接口电源,容量都为200 MW,并将 G_2 和 G_4 出力减少到500 MW。根据全阶模型计算得到的系统模态如图5所示,在系统中,仍然存在区间振荡模式和区域

本地振荡模式,具体特征根分布如表 1 所示。

表 1 中还列出了根据 2 阶模型和恒功率模型计算得到的特征根,可以发现,利用 2 阶模型计算得出的系统特征根与全阶模型基本一致,而恒功率模型的计算结果与全阶模型产生了一定偏差,在第 2 位小数时出现偏差,这样的结果进一步验证了 2 阶模型在低频振荡分析中的有效性。

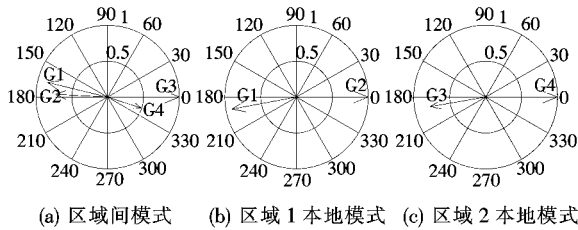


图 5 系统模式

Figure 5 System model

表 1 不同电力电子接口电源模型的系统模式

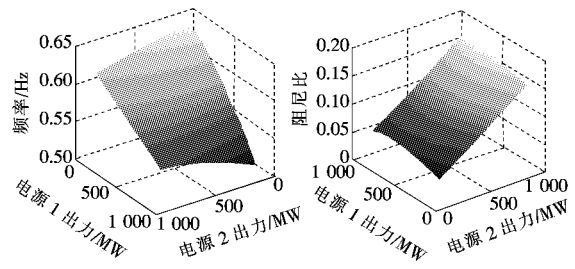
Table 1 System model of different power electronics interface power models

振荡模式	全阶模型	2 阶模型	恒功率模型
区间	-0.268 1±	-0.268 1±	-0.258 1±
	3.968 6i	3.968 6i	3.922 1i
区域 1	-2.227 7±	-2.227 6±	-2.211 4±
	6.894 9i	6.894 8i	6.803 2i
区域 2	-1.193 6±	-1.193 6±	-1.173 3±
	5.807 2i	5.807 3i	5.794 8i

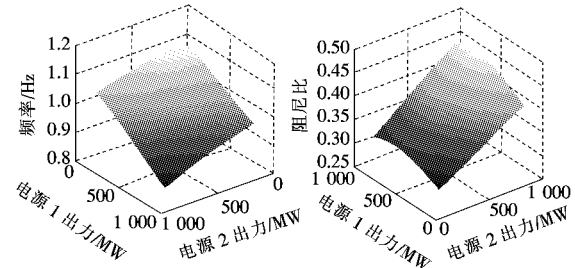
3 电力电子容量对低频振荡的影响

基于 2 阶模型可以研究不同位置接入电力电子接口电源对低频振荡的影响,该文研究 6、8 号母线上不同的电力电子接口电源(对应电源 1、2)容量对区间、本地振荡模式阻尼和振荡频率的影响。两处电力电子接口电源容量在 100~900 MW 范围中变化,在增加电力电子接口电源容量的同时,均匀地减少每台同步发电机的出力。

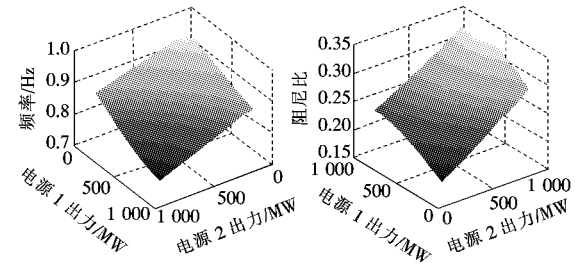
电力电子接口电源容量对低频振荡的振荡频率及对应阻尼比的影响如图 6 所示,可以看出,随着电力电子接口电源容量的增加,无论是区间还是区域本地振荡模式,其基本趋势是振荡频率降低而阻尼比增加,值得注意的是,随着区域 1 中电力电子接口电源容量的增加,其阻尼比会先增加后减少。



(a) 区域间模式



(b) 区域 1 模式



(c) 区域 2 模式

图 6 电力电子接口电源容量对低频振荡的影响

Figure 6 Influence of power electronics interface power supply capacity on low frequency oscillation

4 基于降阶模型的增益参数整定

基于 2 阶模型还可以对电力电子接口电源的下垂控制器增益参数 K_s 进行整定,该文研究图 4 中 2 台电力电子接口电源(容量都为 200 MW)的 K_s 对低频振荡的影响,如图 7 所示, K_s 的变化范围为 0~3.5,随着 K_s 的增大,区间振荡的阻尼比迅速增大,区域 2 本地振荡的阻尼比也有所增大,而区域 1 本地振荡模式的阻尼比先增大后减小。此外,还有 2 个新的振荡模态的阻尼比迅速减小,并且当 $K_s = 3.5$ 时,出现了负阻尼的情况,因此在设计下垂控制器的增益时,不应该超过此值。

基于全阶模型对下垂控制器的效果进行仿真,其结果如图 8 所示。当母线 9 到母线 11 间的线路

发生三相短路时(短路时间为 100 ms,故障结束后将线路切除),从图 8(a)可以看到,加入下垂控制器后,系统可以更快地恢复到稳定状态。当母线 9、10 上的负荷突增 200 MW 时,从图 8(b)可以看到,下垂控制器增益 $K_s=1.5$ 时有较好的阻尼效果。

还可以验证 $K_s=3.5$ 时,下垂控制器将出现不稳定现象,如图 9 所示。当 $K_s=3.5$,并且系统出现三相短路时,下垂控制器将出现高频的振荡,并且无法消失,这是由于 K_s 过大时出现负阻尼造成的,这与降阶模型得出的结论是一致的。

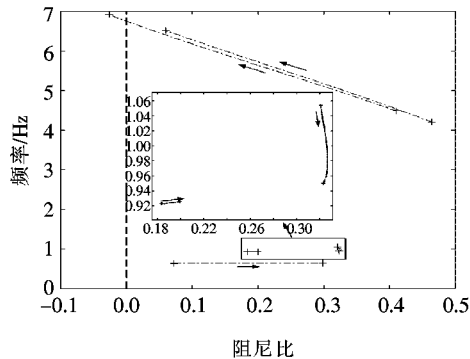


图 7 下垂控制器增益对低频振荡的影响

Figure 7 Influence of droop controller gain on LFO

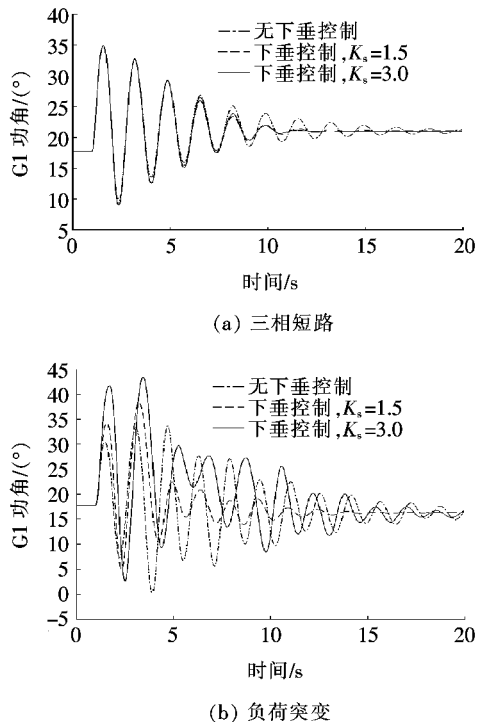
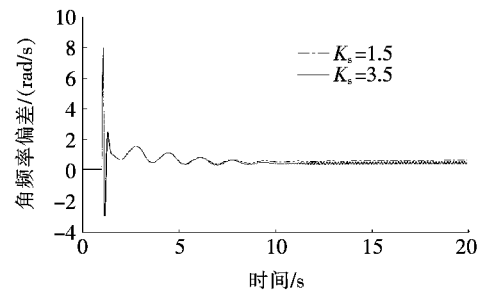
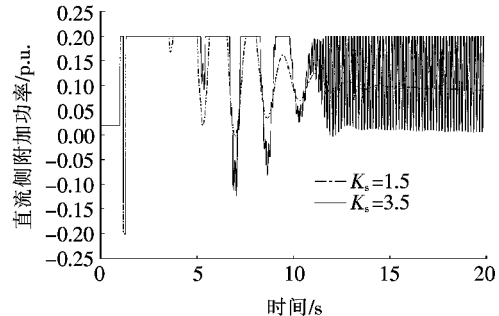


图 8 下垂控制器增益对低频振荡的影响

Figure 8 Influence of droop controller on LFO



(a) 下垂控制器输入(母线 6)



(b) 下垂控制器输出

图 9 下垂控制器中的不稳定现象

Figure 9 Unstable phenomenon of droop controller

5 结语

该文介绍了适用于电力系统低频振荡分析的电力电子接口电源模型。通过对三相逆变电路进行建模及模型降阶,提出了适用于低频振荡分析的 2 阶电力电子接口电源模型,并指出 2 阶模型与恒功率模型相比有较高的精度。基于此模型,该文还分析了电力电子接口电源容量对区间振荡及本地振荡的振荡频率及阻尼比的影响,分析结果表明:随着其容量的增加,区间振荡和本地振荡的振荡频率都会升高,且阻尼比也会有所增加。该文还基于降阶模型对电力电子接口电源的下垂控制器的增益进行整定,研究表明,过高的下垂控制器增益将造成控制器的不稳定。

参考文献:

- [1] 朱蜀,刘开培,秦亮,等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3948-3962.
- ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: An overview [J]. Proceedings of the CSEE,

- 2017,37(14): 3948-3962.
- [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 Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [3] Li S. Low-frequency oscillations of wind power systems caused by doubly-fed induction generators[J]. Renewable Energy, 2017, 104: 129-138.
- [4] 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 Jing, DU Hongji, ZHAO Dawei, 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.
- [5] Krismanto A U, Nadarajah M, Krause O. Influence of renewable energy based microgrid on low frequency oscillation of power systems[C]// IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Brisbane, Australia, 2015.
- [6] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [7] Ma J, Song Z, Zhang Y, et al. Robust stochastic stability analysis method of DFIG integration on power system considering virtual inertia control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4069-4079.
- [8] Ma J, Qiu Y, Li Y, et al. Stability analysis of power system with multiple operating conditions considering the stochastic characteristic of wind speed[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 1056-1066.
- [9] 朱瑞可,王渝红,李兴源,等. 用于 VSC-HVDC 互联系统的附加频率控制策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(16):81-87.
ZHU Ruike, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. An additional frequency control strategy for interconnected systems through VSC HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 81-87.
- [10] 余希瑞,周林,郭珂,等. 多模型自适应控制应用于大型光伏电站阻尼区间振荡[J]. 中国电机工程学报,2017,37(14):4036-4043.
YU Xirui, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Application of multiple-model adaptive control for damping inter-area oscillations by large-scale photovoltaic plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4036-4043.
- [11] Zhang X, Lu C, Liu S, et al. A review on wide-area damping control to restrain inter-area low frequency oscillation for large-scale power systems with increasing renewable generation[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 45-58.
- [12] 朱蜀,刘开培,秦亮. 虚拟同步发电机的暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(9):51-58.
ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang. Transient stability analysis of virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 51-58.
- [13] 鲁宗相,汤海雁,乔颖,等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力,2018,51(1):51-58.
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: A review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.
- [14] 马燕峰,霍亚欣,李鑫,等. 考虑时滞影响的双馈风电场广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报,2020,35(1):158-166.
MA Yanfeng, HUO Yaxin, LI Xin, et al. Design of wide area additional damping controller for doubly fed wind farms considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 158-166.
- [15] 郑小革,王春风,王境彪,等. 含直驱风电场的交直流混合系统非强阻尼低频振荡特性分析[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(3):148-154.
ZHENG Xiaoge, WANG Chunfeng, WANG JingBiao, et al. Analysis of the weak or negative damp low-frequency oscillation characteristics AC/DC system integrated by PSMG-based wind frames[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 148-154.