双馈风机系统的切换型混沌振荡及其非光滑分岔特性

薛安成,付潇宇,王嘉伟,李业成,乔登科 (华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:新能源电力系统含限幅或控制切换等非线性环节,本质上为非光滑系统,其稳定性和失稳形式复杂。 对此,研究了大扰动下双馈风机并网系统中由限幅饱和导致的混沌振荡失稳机理,在数学上对应着非光滑系 统轨迹发生从收敛至平衡点到混沌的非光滑分岔。首先,介绍了切换动力系统(非光滑系统)的非光滑分岔 和切换型混沌;其次,分析了交流故障后双馈风机系统发生的复杂振荡现象,利用功率谱和Lyapunov指数确 认其为混沌振荡,并分析了其拟周期的频率漂移特性;然后,分析了混沌振荡与限幅饱和间的关系,揭示了该 混沌是由多个限幅饱和(非光滑系统切换)引起的,本质上为切换型混沌振荡;最后,从短路比、故障条件和风 速等角度分析了大扰动后的切换型混沌振荡的非光滑分岔特性,结果表明在较低短路比、较大故障冲击下系 统更易发生切换型混沌振荡。

关键词:双馈风机;非光滑分岔;限幅;混沌振荡;交流故障 中图分类号:TM 614;TM 712 文献标志码

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009005

0 引言

新能源系统含有多时间尺度控制的电力电子设备,带有大量的切换环节(如限幅),总体上改变了电力系统的本征结构,使得电力系统变为具有强非线性的非光滑系统,其动作行为也愈加复杂,失稳形态复杂^[1-2]。

目前,电力电子化电力系统的次同步振荡因频 繁出现而成为研究的重点。从数学角度看,新能源 系统次同步振荡对应的数学解释主要有3种:一是 负阻尼振荡[3-10],二是强迫振荡[11-14],三是切换型振 荡[15-19](非光滑振荡)。负阻尼振荡机理方面,采用 基于系统的小信号模型来分析平衡点的局部稳定 性,目前主要分为基于频域的阻抗法[3-5]和基于时域 的特征值法[6-10]。强迫振荡机理方面,由于新能源系 统中含有多样化的电力电子装置,存在系统中的某 些装置由于控制或参数选取不当自发产生次 / 超同 步电流,从而导致次/超同步振荡的可能,因此现有 文献主要关注扰动下的风机多频率响应特性[11-13]。 切换型振荡机理方面,主要是由电力系统存在的非 线性因素如限幅、死区等环节导致。限幅或死区环 节起作用时,系统数学模型变为非光滑动力系统(或 分段光滑系统)[2],系统轨线相当于切换到另一不同 的光滑系统,由此导致的非光滑振荡(轨线连续但不 可微),对应着系统大范围出现极限环。在此方面, 文献[14]介绍了由励磁系统的限幅环节导致的单机

收稿日期:2020-05-13;修回日期:2020-07-07

基金项目:国家重点研究发展计划项目(2017YFB0902000, 2017YFB0902004)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902000,2017YFB0902004) 无穷大系统切换型低频振荡现象。文献[15]基于非 光滑分岔理论分析了含水电电网在大扰动下的切换 型超低频振荡机理。文献[16-17]探讨了由新能源 电力系统限幅造成的切换型次同步振荡。具体地, 文献[16]基于非光滑分岔理论分析了由直流电压环 节限幅引起的直驱风机系统的次同步频段振荡现 象;文献[17]则研究了双馈风机(DFIG)系统中由转 子电流限幅造成的交流故障期间的次同步频段振荡 现象。

对于新能源电力系统,其限幅和控制切换等非 线性环节对系统特性有重要影响,目前在此方面的 研究较少。除上述切换型振荡外,文献[18-19]讨论 了单逆变器系统在大扰动下切换至低电压穿越控制 策略时,系统的平衡点消失和小干扰失稳这2种复 杂振荡失稳形式。文献[20]探讨了风机中变流器和 桨距角限幅对系统动态特性的影响。文献[21]分析 了限幅环节对直流电压的影响。文献[22]认为在不 同故障深度下,双馈风机故障中的稳态功率输出由 不同的限幅环节决定。值得注意的是,限幅这类切 换也可能导致系统出现混沌振荡[14]。然而,在含限 幅的非光滑新能源电力系统方面,研究混沌振荡的 文献主要为对风电场混沌序列的识别预测方法与基 于时间序列的相空间重构的优化[23-25],未有对新能 源系统中混沌振荡发生机理的分析。进一步地,实 际风电场中的次同步振荡的频率存在大幅度的动态 变化[26],即频率漂移问题,该问题复杂,难以用单一 的稳定振荡来揭示。然而,若系统出现混沌振荡,从 周期性振荡角度看,其振荡频率是变化的,即频率漂 移也可能来自混沌振荡。

本文研究双馈风机系统在交流故障后由多限幅 环节导致的振荡失稳现象,即振荡形式为频率时变 的拟周期混沌振荡,该现象不同于文献[16]直驱风 机系统交流故障后和文献[17]双馈风机系统交流故 障中的固定周期型切换型次同步振荡现象。本文研 究可为次同步振荡频率漂移提供新的解释,进一步 地,基于非光滑分岔理论,分析短路比(SCR)、故障 条件及风速等参数对发生切换型混沌振荡的影响。 上述研究可有助于进一步理解新能源电网的失稳 现象。

1 非光滑分岔与切换型混沌

数学上,含有控制切换/限幅等切换的电力系 统属于非光滑动力系统。对于非光滑系统,因其切 换界面的存在,系统响应稳定、振荡或发散与轨迹是 否遇到切换面存在明显关联,其动力学复杂。正常 运行工况下,设备运行留有一定裕度,系统运行的稳 定平衡点远离其切换/限幅面。而在大扰动下,系 统偏离平衡点,系统轨迹可能与切换面相交,在分区 域光滑的系统之间切换,进而形成稳定的非光滑极 限环(对应系统的切换型振荡)或者切换型混沌振荡 (对应系统的非光滑混沌吸引子)。

从分岔角度看,系统切换引起的振荡/混沌均 与非光滑系统的分岔相关。对于极限环的分岔,根 据轨线切换形式,非光滑分岔有多种分类,具体可包 括C-分岔、滑动分岔、擦边分岔、类Hopf分岔和类同 宿轨分岔^[27]等。对于和切换型混沌振荡相关的分 岔,目前在非光滑分岔领域,已有诸多示例,但未见 分类。特别值得注意的是,文献[28]指出非光滑系 统随参数变化时,其吸引子可直接由收敛到平衡点 变为混沌吸引子。该现象不同于光滑系统,系统随 参数变化出现混沌前,往往会出现周期轨、倍周期分 岔等现象。另外,非光滑系统的切换型振荡/混沌 是一种大范围的动力学特性,与非光滑系统平衡点 的性质并无对应关系,传统的小信号稳定性分析方 法难以适用。

2 双馈风机并网系统及其混沌振荡现象

本节首先介绍双馈风机系统整体的模型以及控

制中的切换/限幅环节。进而结合功率谱和最大 Lyapunov指数判断系统在发生交流故障后产生的混 沌振荡现象。

2.1 双馈风机系统及其限幅

双馈风机系统结构如图1所示,包括风力机、异 步机、背靠背换流器及外部电网。换流器控制包括 机侧换流器和网侧换流器。其中机侧换流器采用定 子磁链定向的解耦策略,通过控制转子侧d轴和q轴 电流分别实现对输出无功和有功的控制;网侧换流 器采用定子电压定向的解耦策略,通过控制网侧d 轴电流以实现直流稳压,设置网侧q轴电流参考值 为0以实现单位功率因数控制。

机侧和网侧变流器控制中含有多种限幅环节, 本文主要关注其外环限幅。外环限幅通过限制电流 参考值以防止过流,如图1中转子侧d、q轴电流参考 值 *i*_{dr_ref}、*i*_{qr_ref}限幅以及网侧d轴电流参考值*i*_{dg_ref}限幅 所示。值得注意的是,上述限幅环节都是通过对系 统中间变量(电流参考值)进行限幅从而影响系统总 体动态,属于终止限幅范畴^[29]。

在 PSCAD 中搭建上述仿真模型,系统及控制的 典型参数如附录表 A1 所示。

2.2 混沌振荡判定

设置4s时双馈风机出口处发生瞬时三相短路 故障,短路接地电阻为0.01 Ω,故障持续0.5s,其有 功功率和电压的时域波形如图2所示。

在故障切除后,系统出现不衰减且无规则的振荡,其相图如图3所示,相图中的变量均为标幺值, 后同。图3表明,系统并非严格的周期振荡,而是类 似于混沌振荡,其吸引子中存在稠密的、不稳定的周 期轨道。

进一步地,得到电压的功率谱如图4所示。图4 表明,功率谱为连续谱,其中存在尖峰和宽频带的噪 声,尖峰表明除了基频分量外主要含有52.6 Hz超同 步频段的谐波分量。根据文献[30],该带有宽带噪 声的连续功率谱符合混沌振荡的特征。

另一方面,Lyapunov指数可定量描述混沌系统 对初值的敏感性,即2个距离较近的初值所产生的



图 1 双馈风机系统结构图 Fig.1 Structure diagram of DFIG system



172

图2 时域仿真波形



图 3 i_{dr} - i_{qr} - i_{dg} 相图 Fig.3 Phase diagram of i_{dr} - i_{qr} - i_{dg}



图4 功率谱

Fig.4 Power spectrum

轨迹随着时间的推移会产生分离的现象,若系统最大 Lyapunov 指数大于 0,则可以确定系统发生了混沌振荡^[31]。计算最大 Lyapunov 指数有多种方法,本文采用 C-C 法确定时间延迟和重构相空间维数,进而通过小数据量法可得最大 Lyapunov 指数为0.0045,具体过程参考文献[31],在此不再赘述。

由带有宽带噪声的连续功率谱和最大Lyapunov 指数大于0,可判断该系统在给定参数下出现了混 沌,对应系统持续有界而又不规则的振荡。特别值 得注意的是,上述混沌在电压、功率等方面,具有近 似为周期运动的拟周期现象。即从周期振荡角度出发,其频率随时间变化而变化,易被认为是频率漂移的超同步振荡。具体地,在本文中从周期振荡角度出发,其振荡频率约为51~53 Hz,而功率谱中幅值较大的52.6 Hz则近似表示轨道的平均周期。

图 5 给出了 $i_{qr} - i_{qr,ref}$ 相图。图 5 表明,系统轨线 与限幅上下限的交界处连续但不光滑,每条轨线在 交界处的非光滑点 $A_1 - A_4$ 即为限幅作用的标志,因 此,系统轨线组成切换型混沌振荡。



Fig.5 Phase diagram of i_{ar} - i_{ar} ref

3 混沌振荡与限幅的关系

鉴于非光滑的双馈风机系统含有多个限幅 / 切换,本节分析该双馈风机系统在发生交流故障后的 混沌振荡与系统不同限幅的关系。

3.1 放开各限幅与混沌振荡的关系

在该振荡过程中,3种外环限幅均饱和,即对应 的电流参考值在限幅上下限之间变化。单独放开 *i*_{q_ref}限幅上下限时双馈风机输出有功功率的时域图 对比如图6所示。图6表明单独放开*i*_{q_ref}限幅时,系 统在故障后回到稳定平衡点。



图 6 i_{ar ref} 限幅存在与否的动态对比

Fig.6 Dynamic comparison with and without $i_{qr ref}$ limiting

进一步地,单独放开*i*_{dr_ref}限幅和*i*_{dg_ref}限幅时,系统动态对比如表1所示。表1表明,单独放开任一种

表1 不同限幅环节作用下的系统动态对比

Table 1 System dynamic comparison under

different limiting links

限幅作用情况	系统动态
放开 i _{dr_ref} 限幅	回到稳定平衡点
放开 i _{qr_ref} 限幅	回到稳定平衡点
放开 i _{dg_ref} 限幅	回到稳定平衡点
3种限幅同时存在	混沌

限幅系统稳定,因此限幅存在时混沌振荡是系统中 多限幅共同作用(或在多个光滑系统中发生切换)的 结果。

3.2 限幅值大小与混沌振荡的关系

限幅的存在与否会改变系统大范围的动力学特性,决定大扰动下系统是否发生混沌。同时,限幅值的大小也会在一定程度上影响该混沌振荡的特性。图7给出了当*i_{qr,ref}*的限幅上限*i_{qr,max}=1.5* p.u.时的混沌吸引子的三维图,该图明显不同于图3所示(*i_{qr,max}=1* p.u.)的混沌吸引子。





进一步地,*i*_{qr.max}改变时平均振荡频率也会发生 变化,平均振荡频率由功率序列的快速傅里叶变换 (FFT)的最大振幅所对应的频率的倒数估计得到。 具体地,当*i*_{qr.max}为1、1.5、2 p.u.时,平均振荡频率分 别为52.6、52.7、52.9 Hz,即平均振荡频率随着*i*_{qr.max} 的增大而增大。从系统动力学的角度出发,限幅值 决定限幅 / 切换面与平衡点的距离,随着限幅值的 改变,在相同扰动与初值下系统轨线与限幅面相交 的时间会发生变化,从而造成轨线周期等特性的 差异。

4 非光滑分岔特性分析

本节分别分析 SCR、故障持续时间和接地电阻 以及风速等参数变化时,非光滑的双馈风机系统的 动力学行为变化,即参数的分岔特性。

4.1 SCR

通过增大网络阻抗来模拟SCR减小,探究交流 系统变弱时系统的最终行为,其结果如表2所示。

表 2 表明,当 SCR 值 δ_{SCR} >15 时,故障期间较强的电压支撑作用使双馈风机维持较高的功率输出, 在故障切除后回到稳定运行状态,双馈风机输出有功功率如图 8(a)中 δ_{SCR} =16 所示;当 8.49 < δ_{SCR} <15 时,随着 SCR 减小,系统由稳定到混沌,经历了非光滑分岔,在故障后直接由稳定平衡点跃变为收敛到 混沌吸引子,且随着 SCR 减小,混沌振荡的整体幅值 增大,平均振荡频率减小,如图 8(a)中 δ_{SCR} =9.8 和 δ_{SCR} =12.73 所示;当 7.07 < δ_{SCR} <8.49 时,虽然系统在

表2 不同 SCR 下的系统行为对比

Table 2 System behavior comparison under

different SCRs				
$\delta_{_{ m SCR}}$	系统动力学特征	平均振荡 频率 / Hz		
2.89	扰动前具有不稳定 的平衡点	10.1		
5.23	扰动前具有稳定平衡点,大扰动后 收敛到平衡点	—		
7.96	扰动前具有稳定平衡点,扰动后发生 混沌振荡,最后混沌吸引子 破裂导致系统崩溃	_		
9.8	扰动前具有稳定平衡点,大扰动后	52		
12.73	发生混沌振荡	52.6		
16	扰动前具有稳定平衡点,大扰动后 收敛到平衡点	—		

故障后收敛到混沌吸引子,但最后混沌吸引子破裂导致系统崩溃,如图8(b)所示;当3.2< δ_{scr} <7.07时,故障后系统可收敛到稳定平衡点,最后当SCR进一步减小时,系统由稳定平衡点变为不稳定平衡点,产生频率为10.1Hz的次同步振荡,即经历了Hopf分岔,如图8(c)所示。





从分岔角度出发,随着SCR的减少,故障后系统 会产生混沌振荡,即系统对于SCR参数出现了从平衡 点到混沌吸引子的非光滑分岔,同时,伴随着非光滑 系统平衡点从稳定到不稳定的非光滑平衡点分岔。

4.2 故障严重程度

本小节通过增大故障接地电阻*R*和减小持续时间*S*来模拟扰动严重程度的减小。表3给出了不同

故障时间及接地电阻下的系统行为对比。当R=0、 S>0.48 s时,系统随着S增大,经历了由收敛到稳定 平衡点到混沌的非光滑分岔,如图9中S为0.45 s和 0.5 s的有功功率时域图和 $i_{qr}-i_{dg}$ 相图对比所示,且S 增大时平均振荡频率降低。同样,当S=0.5 s、R>0.07 Ω时,系统随着R的增大经历了由混沌到稳定 的非光滑分岔,时域图和相图与图9类似,在此不再 赘述。

表3 不同故障条件的系统行为对比

Table 3 System behavior comparison under different fault conditions

故障条件	系统行为	平均振荡 频率 / Hz
R=0,S=0.4 s	大扰动后收敛到稳定平衡点	
<i>R</i> =0, <i>S</i> =0.5 s	大扰动后发生混沌振荡	52.6
<i>R</i> =0, <i>S</i> =0.6 s	大扰动后发生混沌振荡	51
$R{=}0.1~\Omega,S{=}0.5~\mathrm{s}$	大扰动后收敛到稳定平衡点	_





从分岔角度出发,随着故障严重程度的增加,故 障后系统产生混沌振荡,即系统对于故障严重程度 参数出现了从平衡点到混沌吸引子的非光滑分岔。 同时,该混沌振荡的发生需要故障后有足够大的初 值和限幅饱和/切换的作用。

4.3 风速的影响

当双馈风机运行在最大功率点跟踪(MPPT)模式下时,双馈风机输出功率随着风速增大而增大。 典型的不同风速下的系统行为如表4所示。分析表明,当风速小于9m/s时,系统在故障后收敛到稳定 平衡点,如图10中风速为6m/s和8m/s的时域图 所示(图中*iq_ref*为标幺值),系统在稳态时的*iq_ref*值随 着风速增大更接近限幅上限;当风速大于9m/s时, 系统发生非光滑分岔,从而直接由稳定平衡点收敛 到混沌吸引子,如图10中风速为10m/s所示,此时 *iq_ref*在限幅上、下限间形成等幅振荡,且随风速增大

该混沌振荡的平均频率略有增大。

表4 不同风速下的系统行为对比

Table 4 System behavior comparison under

different wind speeds

风速/ $(m \cdot s^{-1})$	系统行为	平均振荡频率 / Hz
8	大扰动后收敛到稳定平衡点	—
10	大扰动后发生混沌振荡	52.6
12	大扰动后发生混沌振荡	53



图 10 不同风速下的 i_{ar ref} 动态

Fig.10 Dynamic of $i_{qr_{ref}}$ under different wind speeds

从分岔角度出发,风速增大时故障后系统产生 混沌振荡,即系统对于风速这一参数出现了从平衡 点到混沌吸引子的非光滑分岔。

5 结论

本文研究了由限幅导致的双馈风机系统的混沌 振荡失稳现象,在数学上对应着非光滑系统的非光 滑分岔,并分析了不同参数的分岔特性,得到主要结 论如下:

(1)给出了新能源系统的一种新的失稳路径,双 馈风机并网系统可在大扰动下经历非光滑分岔由收 敛到稳定平衡点跃变为收敛到混沌吸引子;

(2)双馈风机系统的混沌振荡是交流故障和多 个外环限幅环节共同作用的结果,其本质上也属于 切换型混沌,在物理上表现为频率变化的近似周期 运动,可为次同步振荡频率变化提供一个新的解释;

(3)系统对于SCR、故障接地电阻和故障持续时 间以及风速等参数具有非光滑分岔特性,即在具有 大扰动和弱网连接下,更易产生混沌振荡。

特别地,本文仅介绍了切换型混沌振荡现象。 未来还需建立单机系统的分段光滑动力学模型,并 结合非光滑分岔理论阐述切换型混沌振荡发生的数 学机理及其分岔类型;从非线性系统控制角度出发, 研究相应的混沌振荡消除措施;进一步地,推广到多 机系统时,还需考虑不同风机在同一故障下的不同 响应所带来的挑战。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1]徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. 南

175

方电网技术,2020,14(2):1-9.

XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2):1-9.

- [2] XUE Ancheng, FU Xiaoyu, QIAO Dengke, et al. A new nonsmooth simplified model for DFIG in electromechanical transient analysis[J]. IEEE Access, 2020, 8:97335-97342.
- [3]谢小荣,刘华坤,贺静波,等.直驱风机风电场与交流电网相互 作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J].中国电机工程学 报,2016,36(9):2366-2372.

XIE Xiaorong,LIU Huakun,HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(9):2366-2372.

- [4]年珩,杨洪雨.不平衡运行工况下并网逆变器的阻抗建模及稳定性分析[J].电力系统自动化,2016,40(10):76-83.
 NIAN Heng,YANG Hongyu. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected inverters under unbalanced operation conditions[J]. Automation of Electric Power Systems,2016, 40(10):76-83.
- [5]张冲,王伟胜,何国庆,等.基于序阻抗的直驱风电场次同步振 荡分析与锁相环参数优化设计[J].中国电机工程学报,2017, 37(23):6757-6767.

ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):6757-6767.

- [6]杨健,蔡晖,宋鹏程,等.采用直接电流控制策略的 MMC-UPFC 小信号模型[J].电力自动化设备,2019,39(10):123-129.
 YANG Jian,CAI Hui,SONG Pengcheng, et al. Small-signal model of MMC-UPFC with direct current control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):123-129.
- [7] 陈宝平,林涛,陈汝斯,等.采用VSC-HVDC并网的直驱风电场 次/超同步振荡特性[J].电力系统自动化,2018,42(22):44-59.
 CHENG Baoping,LIN Tao,CHEN Rusi,et al. Analysis on characteristics of sub/super-synchronous oscillation caused by gridconnected direct-drive wind farm via VSC-HVDC system [J].
 Automation of Electric Power Systems,2018,42(22):44-59.
- [8] 吴汪平,楚皓翔,解大,等. PI 控制器参数对并网永磁直驱型风 力发电系统机网相互作用的影响[J]. 电力自动化设备,2017, 37(10):21-28.

WU Wangping, CHU Haoxiang, XIE Da, et al. Influence of PI controllers' parameters on machine-network interaction of gridconnected PMSG system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):21-28.

- [9] FAN L L,KAVASSERI R,MIAO Z L,et al. Modeling of DFIGbased wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4):2073-2082.
- [10] 刘宇明,黄碧月,孙海顺,等. SVG与直驱风机间的次同步相互 作用特性分析[J]. 电网技术,2019,43(6):2072-2079.
 LIU Yuming,HUANG Biyue,SUN Haishun,et al. Study on subsynchronous interaction between D-PMSG-based wind turbines and SVG[J]. Power System Technology,2019,43(6):2072-2079.
- [11] 陈磊,王文婕,王茂海,等.利用暂态能量流的次同步强迫振 荡扰动源定位及阻尼评估[J].电力系统自动化,2016,40(19): 1-8.

CHEN Lei, WANG Wenjie, WANG Maohai, et al. Disturbance source location of subsynchronous forced oscillation and damping evaluation using transient energy flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19):1-8.

[12] 李景一,毕天姝,于钊,等. 直驱风机变流控制系统对次同步频

率分量的响应机理研究[J]. 电网技术,2017,41(6):37-43. LI Jingyi,BI Tianshu,YU Zhao,et al. Study on response characteristics of grid converter control system of Permanent Magnet Synchronous Generators(PMSG) to subsynchronous frequency component[J]. Power System Technology,2017,41(6):37-43.

[13] 薛安成,王子哲,吴雨,等.次同步扰动下并网电压源换流器电 气量的频率分布及其幅值特性[J].电力自动化设备,2019,39 (3):23-29.

XUE Ancheng, WANG Zizhe, WU Yu, et al. Frequency distribution and amplitude characteristic of electric flux for gridconnected voltage source converter under subsynchronous disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (3):23-29.

- [14] JI W, VENKATASUBRAMANIAN V. Hard-limit induced chaos in a fundamental power system model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(5):279-295.
- [15] XUE Ancheng, WANG Jiawei, DING Guoqiang, et al. On the mechanism and control for the ultra-low frequency oscillation in NY Power Grid with large-scale hydropower[J]. Control Theory and Technology, 2019, 17(3):241-251.
- [16] 薛安成,王子哲,付潇字,等.基于非光滑分岔的直驱风机次同步振荡机理分析[J].电力系统自动化,2020,44(7):87-92.
 XUE Ancheng,WANG Zizhe,FU Xiaoyu,et al. Mechanism analysis of subsynchronous oscillation in direct-driven wind turbine based on non-smooth bifurcation[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(7):87-92.
- [17] XUE Ancheng, FU Xiaoyu, WANG Zizhe, et al. Analysis of subsynchronous band oscillation in a DFIG system with nonsmooth bifurcation [J]. IEEE Access, 2019, 7:183142-183149.
- [18] 袁辉,辛焕海,王康,等. 弱电网下远端严重电压跌落时逆变器 并网失稳机理分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):38-43. YUAN Hui,XIN Huanhai,WANG Kang,et al. Instability mechanism analysis of inverters connected to weak grid during severe voltage sag on remote grid side[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(22):38-43.
- [19] YUAN Hui,XIN Huanhai,HUANG Linbin, et al. Stability analysis and enhancement of type-4 wind turbines connected to very weak grids under severe voltage sags[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2):838-848.
- [20] HISKENS I A. Dynamics of type-3 wind turbine generator models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 465-474.
- [21] 汪万伟,尹华杰,管霖.双闭环矢量控制的电压型PWM整流器 参数整定[J].电工技术学报,2010,25(2):67-72.
 WANG Wanwei,YIN Huajie,GUAN Lin. Parameter setting for double closed-loop vector control of voltage source PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010, 25(2):67-72.
- [22] 薛安成,耿继瑜,刘瑞煌,等.限幅环节对DFIG故障中输出特性的影响研究[J].电力自动化设备,2017,37(10):29-33,56.
 XUE Ancheng,GENG Jiyu,LIU Ruihuang,et al. Impact of limiter on output characteristics of DFIG during fault[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):29-33,56.
- [23] 黎静华,黄玉金,黄乾. 基于改进混沌时间序列的风电功率区间预测方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):53-60.
 LI Jinghua,HUANG Yujin,HUANG Qian. Interval prediction method of wind power based on improved chaotic time series
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):53-60.
- [24] 安学利,蒋东翔.风力发电机组运行状态的混沌特性识别及其 趋势预测[J].电力自动化设备,2010,30(3):15-19.
 AN Xueli,JIANG Dongxiang. Chaotic characteristics identification and trend prediction of running state for wind turbine

[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3):15-19.

- [25] 陶佳,张弘,朱国荣,等.基于优化相空间重构技术的风电场发电功率预测研究[J].中国电机工程学报,2011,31(28):9-14.
 TAO Jia,ZHANG Hong,ZHU Guorong, et al. Wind power prediction based on technology of advanced phase space reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(28):9-14.
- [26] 王洋,杜文娟,王海风.风电并网系统次同步振荡频率漂移问题[J].电工技术学报,2020,35(1):146-157.
 WANG Yang,DU Wenjuan,WANG Haifeng. Frequency drift of sub-synchronous oscillation in wind turbine generator integrated power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(1):146-157.
- [27] DI BERNARDO M,BUDD C J,CHAMPNEYS A R,et al. Piecewise-smooth dynamical systems: theory and application[M]. London, UK; Springer Verlag, 2008:221-225.
- [28] DI BERNARDO M, NORDMARK A, OLIVAR G. Discontinuityinduced bifurcations of equilibria in piecewise-smooth and impacting dynamical systems[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2008, 237(1):119-136.
- [29] VENKATASUBRAMANIAN V, SCHATTLER H, ZABORSKY J. Dynamics of large constrained nonlinear systems-a taxonomy

theory[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11):1530-1561.

- [30] CHIANG H D,LIU C W,VARAIYA P P,et al. Chaos in a simple power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993,8(4):1407-1417.
- [31] 吕金虎,陆君安,陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武 汉:武汉大学出版社,2005:85-88.

作者简介:



薛安成(1979—),男,江苏常熟人,教授,博士,主要研究方向为模型和数据驱动的新能源电力系统稳定性分析和安全防御、二次设备评估(E-mail:acxue@ncepu.edu.cn);

付潇宇(1996—), 男, 湖南岳阳人, 硕 士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统 复杂振荡(**E-mail**: fxylal@163.com);

王嘉伟(1996—),男,湖南邵阳人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统的分析与控制(E-mail: 15650759520@163.com)。

(编辑 李玮)

Switched chaotic oscillation and non-smooth bifurcation characteristics of DFIG system XUE Ancheng, FU Xiaoyu, WANG Jiawei, LI Yecheng, QIAO Dengke

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The new energy power system contains nonlinearities such as limiting or control switching, which is essentially a non-smooth system, and its stability and instability forms are complicated. The instability mechanism of chaotic oscillation caused by limiting saturation in DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) system under large disturbance is studied, and it mathematically corresponds to the non-smooth bifurcation of non-smooth system trajectory from convergence to stable equilibrium point to chaos. Firstly, the non-smooth bifurcation and switched chaos of switched dynamic system (non-smooth system) are introduced. Secondly, the non-regular oscillation phenomenon in DFIG system after AC fault is analyzed, and it is confirmed as a chaotic oscillation with the power spectra and Lyapunov exponent, furthermore, its pseudo-period frequency drift characteristics are analyzed. And then, the relationship between the chaotic oscillation and the limiting saturation is analyzed, revealing that the chaotic oscillation is induced by multiple limiting saturation (switching of non-smooth system), and it is essentially a switched chaotic oscillation. Finally, the non-smooth bifurcation characteristics of the switched chaotic oscillation under large disturbance are analyzed with the viewpoint of SCR(Short Circuit Ratio), fault condition and wind speed, indicating that the chaotic oscillation is more likely to occur under the condition of lower SCR and larger disturbance.

Key words: DFIG; non-smooth bifurcation; limiting; chaotic oscillation; AC fault

附录

Tab	Table A1 System parameters	
参数	数值	
额定功率	1.25 MW	
额定电压	0.69 kV	
风速	10 m/s	
日止扣会粉	$R_{\rm s}$ =0.00825 p.u., $R_{\rm r}$ =0.00736 p.u.,	
开少机参数	$L_{\rm s}$ =0.0612 p.u., $L_{\rm r}$ =0.0978 p.u., $L_{\rm m}$ =2.209 p.u.	
网络阻抗 Zl	$L_{\rm l}$ =50.134 H, $R_{\rm l}$ =4.05 Ω	
RSC 有功功率环	<i>K</i> _{p1} =6, <i>T</i> _{i1} =0.5,limit:0-1	
RSC q 轴电流环	$K_{p2}=0.2, T_{i2}=0.1, limit:-3-3$	
RSC 无功功率环	$K_{p3}=10, T_{i3}=0.2, limit:0-1$	
RSC d 轴电流环	$K_{p4}=0.2, T_{i4}=0.1, limit:-3-3$	
GSC 直流电压环	$K_{p5}=10, T_{i5}=0.2, limit:-1-1$	
GSC d 轴电流环	$K_{\rm p6}$ =11, $T_{\rm i6}$ =0.05,limit:-3-3	
GSC q 轴电流环	$K_{p7}=10, T_{i7}=0.05, \text{limit:-3-3}$	
锁相环参数	$K_{\rm p} = 50, K_{\rm i} = 500$	

表 A1 系统参数