

# 基于非光滑分叉的直驱风机次同步振荡机理分析

薛安成, 王子哲, 付潇宇, 王嘉伟, 乔登科

(新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京市 102206)

**摘要:** 新能源大规模并网引发的振荡问题近来得到广泛关注。目前,忽略变流器的限幅等非线性特性,在稳态工作点附近线性化得到的小信号模型是研究上述振荡问题的主流方法。然而,在某些条件下,变流器中的限幅环节对振荡特性的影响不可忽视。结合相图分析方法,揭示直驱风机次同步频段振荡的数学机理之一是与限幅相关的非光滑分叉。首先,介绍了与限幅环节有关的非线性非光滑分叉理论。其次,介绍了直驱风机并网系统的限幅环节及其和限幅相关的次同步频段振荡现象。再次,分析了不同限幅环节对次同步频段振荡特性的影响,揭示了定子直流电压限幅环节饱和是导致系统振荡的原因。进一步,分析了短路比对系统振荡特性的影响,揭示了参数变化导致的非光滑分叉现象。最后,分析了交流故障持续时间、接地电阻对振荡的影响,揭示了初值导致的非光滑分叉现象。分析表明,直驱风机并网系统在故障清除后产生的次同步频段振荡,是在足够大的故障冲击下多个限幅环节共同作用产生的,数学上,也对应着相应的动力学系统发生非光滑分叉。

**关键词:** 直驱风机; 限幅环节; 非光滑分叉; 振荡特性; 交流故障

## 0 引言

消纳大规模新能源是国家能源战略之一。然而,以风机为主的大规模新能源采用电力电子装置接入,改变了电力系统的结构,产生了一系列安全性问题,其中次同步振荡问题尤为突出。次同步振荡问题可能导致风机脱网,并在特定条件下会激发汽轮机组扭振,危及电网的安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。

新能源设备参与的次同步振荡的产生机理、抑制措施等问题,近几年受到了国内外学者的广泛关注,并取得了显著的成果。其中,文献[3]提出了一种开环模式谐振理论分析方法;文献[4]采用特征根分析法,证实了静止无功发生器(static var generator,SVG)的接入会增大直驱风机次同步振荡风险;文献[5-6]给出了变流器简化阻抗模型;文献[7]提出了风电场的等值聚合方法;文献[8-9]分析了变流控制系统对次同步频率分量的响应特性;文献[10-11]采用阻抗分析法,分析了直驱风机在弱电网下的次同步振荡模态;文献[12]分析了风机虚拟惯量控制对同步机振荡的影响;文献[13-14]建立了适用于振荡特性分析的风机简化模型;文献[15]提出了适用于弱电网的直流线路振荡抑制方法;文献

[16]研究了直驱风机的最优矢量控制策略。

值得注意的是,上述方法均采用小信号模型,分析由线性化系统特征根决定的固有模态激发的振荡,但小信号模型忽略了系统中的限幅等非线性环节,仅能体现系统小范围的振荡模态,而无法准确描述系统在大干扰后大范围内的动力学特性,特别是振荡特性。实际上,某些振荡发生时,限幅环节的作用一般不容忽视。如文献[17-18]指出,系统非线性特性导致超低频振荡过程中,其周期随时间变化。文献[19]给出了光伏-储能混合发电系统非线性行为造成的分岔现象及稳定边界问题。文献[20]指出再热式汽轮机在大扰动时,限幅会使系统形成稳定的极限环(振荡)。文献[21-22]指出,扰动施加前稳定的单机无穷大系统,在大扰动下,励磁限幅环节引起的振荡。文献[23]指出,双馈风机故障中稳态功率输出由不同的限幅环节决定,某些条件下有振荡现象。文献[24]指出,限幅会导致系统出现超低频振荡,并利用非光滑系统分岔理论分析其数学机理。

另一方面,直驱风机中含有多个限幅环节<sup>[25-26]</sup>,有可能存在与上述现象类似的由非线性限幅导致的振荡现象。

有鉴于此,本文结合相图分析法和非光滑分叉理论,分析了限幅环节导致的直驱风机次同步频段振荡的机理,并通过不同短路比(short-circuit ratio,SCR)、交流故障持续时间和接地电阻下振荡特性的变化,从物理上揭示次同步频段振荡,是在足够大的

收稿日期: 2019-07-14; 修回日期: 2019-11-20。

上网日期: 2020-02-24。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902000); 国家自然科学基金资助项目(51477050)。

故障冲击下多个限幅共同饱和起作用产生的,从数学上,揭示次同步频段振荡对应着非光滑分叉现象。

## 1 非光滑分叉简介

数学上,含有限幅的微动力系统属于非光滑系统,如切换微动力系统。对于非光滑系统,因限幅或者切换界面的存在,其动力学特征复杂。

从分叉角度看,与限幅环节饱和和相关的持续振荡特性和非光滑系统分叉相关,西方最早研究这一问题的是Nusse和Yorke,他们首先引入边界碰撞分叉的概念(border-collision bifurcation)<sup>[27]</sup>。目前,非光滑分叉主要有角点碰撞分岔(corner collision bifurcation)和擦边分叉(grazing bifurcation)等<sup>[28]</sup>,分别如图1(a)和(b)所示,其在电力系统中的应用见文献[29]。对于角点碰撞分岔,轨线会越过非光滑切换面(限幅环节),而后其轨迹将完全变成另一种状态方程的形式。而对于擦边分叉,当轨线和非光滑切换面(限幅环节)相交时,轨线会在曲面上停留一定时间后再离开。同时,在轨线和曲面相交处,轨线连续但交点不光滑。如图1中的 $P_1$ 和 $P_2$ 点,其可视为轨线和非光滑切换面相交的标志之一。此时,非光滑系统中的限幅环节饱和起作用。

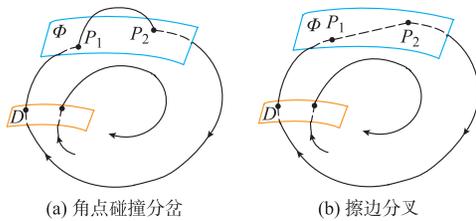


图1 非光滑分岔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-smooth bifurcation

图1中 $D$ 为Poincare映射截面,当Poincare映射截面存在不动点,且该映射特征根模值均小于1时,系统出现稳定的极限环<sup>[30]</sup>。即在适当的参数、初值条件下,系统出现稳定的振荡,在相图中体现为稳定的极限环。进一步,对于多个限幅(非光滑切换面)存在的情形,有可能出现不同曲面轨线和空间轨线相联,形成较为复杂的稳定振荡。

限幅环节饱和和引起的振荡不同于弱阻尼下的振荡,该振荡是大范围(甚至是全局)的振荡,即非光滑分叉是大范围动力学的分叉。而弱阻尼下的振荡是系统在局部范围内的振荡,一般对应于局部平衡点的Hopf分叉。因此,传统的与平衡点相关的基于小信号的分析方法,如根轨迹法、李雅普诺夫第一法等是否适用分析该问题,还有待研究。

## 2 系统及次同步频段振荡现象

### 2.1 并网系统及其限幅环节介绍

直驱风机并网系统含有风力机、永磁同步发电

机以及全功率背靠背变流器等元件,直驱风机通过0.69 kV/35 kV升压变压器接入35 kV交流电网,结构如附录A图A1所示。

系统中全功率背靠背变流器主要包括机侧变流器和网侧变流器。机侧变流器采用机侧变流器电流 $q$ 轴分量 $i_{sq}=0$ 的最大转矩控制,网侧变流器采用电网电压定向网侧变流器电流 $d$ 轴分量 $i_{gd}=0$ 的单位功率因数控制。直驱风机变流器的比例-积分(PI)环节中均含有相应的限幅环节,具体见附录A图A2和图A3。有功功率外环和直流电压外环中的PI限幅主要是限制电流不超过器件最大承受电流能力,限幅值随运行工况变化。内环中的PI限幅主要是限制参考电压不超过器件可耐受电压,限幅值一般保持不变。

### 2.2 振荡现象的时域和相图分析

对直驱风机并网系统的系统中,设置 $t=1$  s时,在变压器35 kV侧和交流电网之间发生的三相短路故障,接地电阻为0,故障持续200 ms后切除(故障位置如附录A图A1所示)。

在上述故障下,系统在0~3 s时间段直驱风机并网处的电压、电流、有功功率波形图如图2和附录B所示,在0~1 s时间段,系统达到稳态;在1~1.2 s时间段,直驱风机并网点发生三相短路故障,交流电压跌落至很小的值,交流电流逐渐增大,直驱风机有功输出降低;在1.2 s后,系统出现等幅值功率振荡,交流电压和电流均存在振荡。

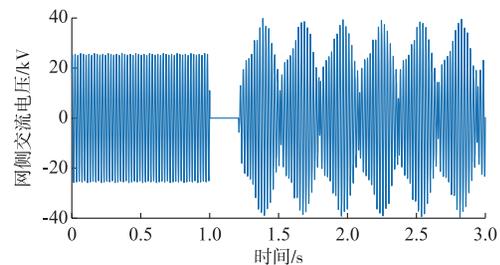


图2 并网点电压波形

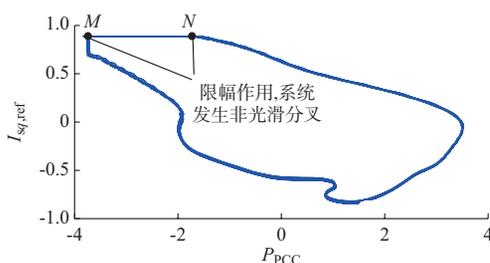
Fig. 2 Voltage waveform at grid connection point

在1.2 s后,系统交流电流、交流电压及有功功率的幅频特性分析见附录B,其有功功率主要含有3.5 Hz主导的频率分量,交流电压和交流电流中含有对应的53.5 Hz(50 Hz+3.5 Hz)及46.5 Hz(50 Hz-3.5 Hz)频率分量。

图2表明,故障切除0.2 s后,出现振荡。相应的,系统并网点有功功率标幺值 $P_{PCC}$ 和机侧变流器 $q$ 轴电流指令值标幺值 $I_{sq,ref}$ 的相图如图3所示。

图3表明,故障切除后系统构成稳定的极限环,当轨线与 $M$ 和 $N$ 点接触时,触发机侧变流器有功功率外环限幅饱和,产生“不光滑”现象。

本文中限幅引发的振荡在次同步频段范围内。

图3  $P_{PCC}$ - $I_{sq,ref}$ 的相图分析Fig. 3 Analysis of phase portrait for  $P_{PCC}$ - $I_{sq,ref}$ 

实际上,在各种系统结构和参数下,限幅引发的振荡可能处于各个频段,即非光滑分叉引起的振荡是一种宽频振荡。

### 3 振荡和限幅环节的关系

直驱风机并网系统的变流器中含有多个限幅环节。稳态运行时,系统运行在平衡点附近,限幅环节不起作用。当系统故障切除后,运行点可能会较大地偏离原有平衡点,此时,当限幅环节饱和(起作用)时,可能形成稳定的极限环,对应产生稳定的振荡。

本章假定放开某些限幅环节,研究不同限幅环节对交流故障诱发的系统振荡特性的影响。

#### 3.1 限幅环节饱和情况

限幅环节输入  $F_{in}$  和输出  $F_{out}$  的关系如式(1)所示。其中  $K_{max}$  和  $K_{min}$  分别为限幅的上下限。

$$F_{out} = \begin{cases} K_{min} & F_{in} \leq K_{min} \\ F_{in} & K_{min} < F_{in} < K_{max} \\ K_{max} & F_{in} \geq K_{max} \end{cases} \quad (1)$$

如式(1)所述,若限幅环节起作用,则输入和输出不同。另将部分限幅环节的上限和下限设为很大的数,则可模拟去除(放开)限幅环节。

放开/保留网侧变流器电压环节限幅时,系统在 0~8 s 时间段的有功功率波形如图 4 所示。

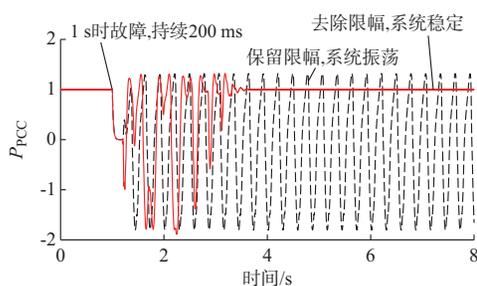


图4 放开/保留直流电压限幅环节时的有功功率变化

Fig. 4 Variation of active power with/without DC voltage limit link

由图4可以看出,放开电压环节限幅后,系统在故障切除后功率逐渐趋于稳定值,不再发生振荡。因此,直流电压环节是系统产生上述振荡的重要诱导因素之一。

#### 3.2 放开单一限幅环节

故障条件不变,分别放开直驱风机并网系统有功功率环的PI限幅、直流电压环的PI限幅  $V_{PCC}$  及网侧变流器内环PI限幅时,系统振荡特性和  $P_{PCC}$ - $V_{PCC}$ - $I_{sq,ref}$  相图结果分别如表1和附录C图C1所示。

表1 放开单个限幅环节的功率振荡特性比较

Table 1 Comparison of power oscillation characteristics when a single limit link is released

类型	有功功率振荡幅值	振荡周期/s
不放开限幅	1.48	0.286
放开有功功率限幅	1.51	0.286
放开内环限幅	1.24	0.286
放开直流电压限幅	无振荡	

比较表1和附录C图C1可知,仅放开有功功率限幅或内环限幅,系统经过一定时间后仍然形成了极限环,不同的是极限环的形状发生了变化。

此外,放开有功功率环限幅虽然改变了控制信号  $I_{sq,ref}$  值,但几乎未改变稳态时并网点电压和功率的大小。

#### 3.3 放开2个限幅环节

考虑放开2个限幅环节,与不放开限幅环节的轨线作比较。设计以下3种情形。

情形1:保留直流电压限幅,放开网侧变流器内环限幅和有功功率限幅。

情形2:保留网侧变流器内环限幅,放开直流电压限幅和有功功率限幅。

情形3:保留有功功率限幅,放开直流电压限幅和网侧变流器内环限幅。

相应地,系统振荡特性和  $P_{PCC}$ - $V_{PCC}$ - $I_{sq,ref}$  相图分别如表2和附录C图C2所示。

表2 放开不同的2个限幅环节的功率振荡特性比较

Table 2 Comparison of power oscillation characteristics when two different limit links are released

类型	有功功率振荡幅值	振荡周期/s
不放开限幅	1.48	0.286
情形1	1.24	0.286
情形2	无振荡	
情形3	无振荡	

表2和图C2表明,在情形1中,系统在故障清除后依然可以形成持续振荡,振荡周期保持不变,但振荡幅值受到不同限幅环节的影响。在情形2和情形3中,系统达到稳态时,均可回到相同的稳定平衡点。因此,保留直流电压限幅环节,直驱风机并网系统在故障清除后才会产生等幅功率振荡。直驱风机变流器中的限幅防止保护设备过流或者过压,实际

中一般不会放开限幅环节。

#### 4 不同 SCR 的影响

本章分析交流系统强度对系统振荡的影响,系统强度用 SCR 表征。

在附录 A 图 A1 所示故障点,设置故障持续时间为 180 ms,接地电阻为 0 的三相接地短路故障,分别比较在 SCR 取 10, 2.5 和 1.2 时,系统在 0~3 s 时间段的有功功率波形和 2~3 s 的  $P_{PCC}$ - $V_{PCC}$  相图分别如图 5 和图 6 所示。

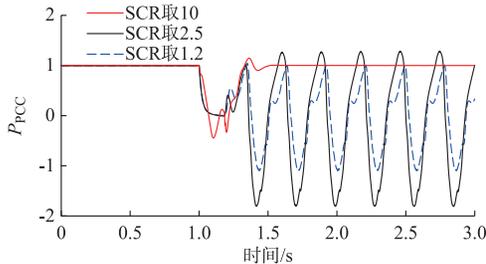


图 5 不同 SCR 下并网点有功功率

Fig. 5 Active power at grid connection point with different SCR values

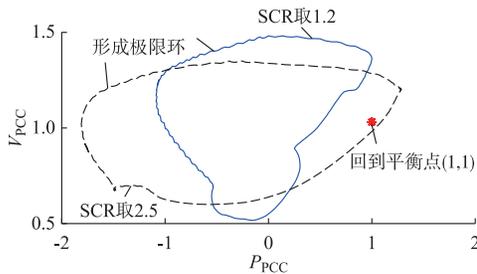


图 6 不同 SCR 的相图比较

Fig. 6 Comparison of phase portraits with different SCR values

图 5 和图 6 表明,在交流系统较强(SCR 取 10)时,系统在故障切除后有功功率恢复到正常水平,振荡消失,从相图上看,系统回到平衡点(1,1);在交流系统较弱时(SCR 取 2.5 和 1.2),故障切除后有功功率出现持续的等幅振荡,从相图上看,系统形成了相应的极限环。同时,不同 SCR 对极限环的形状有一定的影响。具体的,SCR 取 2.5 时有功振荡分量为 0.87(标幺值),而 SCR 取 1.2 时有功振荡分量为 1.45。从物理上看,随着交流系统强度的减弱,系统由无振荡变为振荡。从非光滑分叉角度看,随着 SCR 的减小,系统由无振荡变为振荡,即系统出现非光滑分叉。

#### 5 不同初值的影响

本章分别分析不同故障持续时间和不同故障接地电阻下,系统非光滑振荡特性的变化情况。

故障持续时间和接地电阻会影响故障切除时刻系统状态,即在数学上影响故障后非光滑系统的初

值。一般来说,故障持续时间越长,接地电阻越小,故障严重程度越大,初值离平衡点越远。

##### 5.1 故障持续时间的影响

故障持续时间为 180, 200, 220 ms 时,系统  $P_{PCC}$ - $V_{PCC}$ - $I_{sq,ref}$  相图如附录 C 图 C3 所示。图 C3 表明,在故障持续时间为 180 ms 时,系统轨线经过一段时间的暂态过程,逐渐回到稳定平衡点;而当故障持续时间为 200 ms 和 220 ms 时,系统无法达到稳定平衡点,而是形成了几乎重合的极限环,只是形成极限环的过程稍有不同。鉴于故障持续时间影响故障后初值,因此,上述现象表明,故障引起系统初值的改变足够大且限幅环节饱和起作用,系统才能形成等幅功率振荡。

##### 5.2 故障接地电阻的影响

故障持续期间接地电阻为 100, 50, 0  $\Omega$  时,系统  $P_{PCC}$ - $V_{PCC}$ - $I_{sq,ref}$  相图见附录 C 图 C4。图 C4 表明,在故障接地电阻较大(100  $\Omega$ )时,系统经暂态过程回到稳定平衡点;而在故障接地电阻较小(50  $\Omega$  和 0  $\Omega$ )时,系统经过暂态过程形成了几乎重合的极限环。

因此,故障冲击足够大且系统限幅饱和起作用,是系统在故障清除后形成等幅功率振荡的必要条件,进一步,其形成的极限环位置与初值关系不大,主要由系统运行特性决定。

综合故障持续时间和接地电阻影响可知:从物理上看,在故障程度足够大时,系统中的限幅环节饱和起作用,导致系统在交流故障切除后有可能产生等幅振荡。同时,初值对极限环的位置影响较小。从非光滑分叉角度看,随着故障持续时间增加、接地电阻的减少,故障严重程度增加,导致系统的初值发生变化,系统由无振荡变为振荡,即系统出现非光滑分叉。

#### 6 结语

本文结合相图法,利用非光滑分叉理论,解释了限幅环节参与的直驱风机次同步频段的振荡机理,同时,分析了不同限幅环节对次同步频段振荡的影响,揭示了 SCR、交流故障持续时间和过渡电阻对系统振荡特性的影响,即对应着系统对参数和初值出现的非光滑分叉。结果表明:①直驱风机并网系统在故障清除后产生的次同步频段振荡,是在足够大的故障冲击下多个限幅环节共同饱和起作用产生的,缺少足够大的故障冲击或去除限幅环节,系统不一定形成振荡;②与动力学理论一致,振荡特性与初值的影响不大,主要由变流器限幅环节限幅值和系统的稳态运行特性决定;③网侧变流器中的直流电压限幅环节对系统的振荡产生具有主要作用。

此外,非光滑分叉导致的振荡和系统参数、结构密切相关,在各个频段均可能出现。因此,未来相关

工作应既要关注系统结构/参数的切换,也应注意系统在特定形态下的振荡机理。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参 考 文 献

- [1] 肖湘宁,罗超,廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.  
XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.
- [2] 谢小荣,王路平,贺静波,等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1043-1049.  
XIE Xiaorong, WANG Luping, HE Jingbo, et al. Analysis of subsynchronous resonance/oscillation types in power systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1043-1049.
- [3] 陈骁,杜文娟,王海风. 开环模式谐振条件下直驱风机接入引发电力系统宽频振荡的研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2625-2636.  
CHEN Xiao, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis on wide-range-frequency oscillations of power systems integrated with PMSGs under the condition of open-loop modal resonance [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2625-2636.
- [4] 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.
- [5] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of *D-Q* small-signal impedance of grid-tied inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [6] ALAWASA K M, MOHAMED Y A R I. Impedance and damping characteristics of grid-connected VSCs with power synchronization control strategy [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 952-961.
- [7] WANG H J, VIETO I, SUN J. A method to aggregate turbine and network impedances for wind farm system resonance analysis [C]// 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), June 25-28, 2018, Padua, Italy.
- [8] 王旭斌,杜文娟,王海风. 直驱风电并网系统中锁相环引起次同步振荡的开环模式谐振机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1935-1950.  
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Mechanism analysis of open-loop modal resonance on subsynchronous oscillations caused by PLL in power systems with integrated PMSGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1935-1950.
- [9] 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): 1734-1740.  
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): 1734-1740.
- [10] 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.
- [11] LIU H, XIE X, HE J, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [12] 徐筱倩,黄林彬,汪震,等. 双馈风电机组虚拟惯量控制对电力系统机电振荡的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 11-19.  
XU Xiaolian, HUANG Linbin, WANG Zhen, et al. Analysis on impact of virtual inertia control of DFIG-based wind turbine on electromechanical oscillation of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 11-19.
- [13] 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.  
CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Analysis on characteristics of sub/super-synchronous oscillation caused by grid-connected direct-drive wind farm via VSC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 44-59.
- [14] 徐衍会,曹宇平. 直驱风机网侧换流器引发次/超同步振荡机理研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1556-1564.  
XU Yanhui, CAO Yuping. Research on mechanism of sub/sup-synchronous oscillation caused by GSC controller of direct-drive permanent magnetic synchronous generator [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1556-1564.
- [15] HUANG Y, YUAN X, HU J, et al. DC-bus voltage control stability affected by AC-bus voltage control in VSCs connected to weak AC grids [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2): 445-458.
- [16] LI S, HASKEW T, SWATLOSKI R, et al. Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2325-2337.
- [17] 邓集祥,纪晶,邓斌. 基于复合模式的电力系统超低频振荡产生机理[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 84-89.  
DENG Jixiang, JI Jing, DENG Bin. The generation mechanism of ultra-low frequency oscillation in power systems based on combination modes [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 84-89.
- [18] 赵雅博,张毅威,陈磊,等. 电力系统机电振荡的非线性现象[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 172-177.  
ZHAO Yabo, ZHANG Yiwei, CHEN Lei, et al. Study on nonlinearity in power system electro-mechanical oscillation [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 172-177.
- [19] 韦李军,黄萌,孙建军,等. 带恒功率负载的光伏-储能混合发电系统非线性行为分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 128-137.  
WEI Lijun, HUANG Meng, SUN Jianjun, et al. Nonlinear analysis of photovoltaic battery hybrid power system with constant power loads [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 128-137.
- [20] 戴义平,张镇一,蔡元基,等. 非线性因素与中间再热透平调节

- 系统的稳定性[J]. 汽轮机技术, 1991, 33(1): 8-14.
- DAI Yiping, ZHANG Zhenyi, CAI Yuanji, et al. Nonlinear factors and stability of intermediate reheat turbine regulation system[J]. Turbine Technology, 1991, 33(1): 8-14.
- [21] VENKATASUBRAMANIAN V. Stability boundary analysis of nonlinear dynamics subject to state limits[C]// Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 6, 2001, Maui, USA.
- [22] JI W, VENKATASUBRAMANIAN V. Hard-limit induced chaos in a single-machine-infinite-bus power system [C]// Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control, December 13-15, 1995, New Orleans, USA.
- [23] 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.
- 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.
- [24] XUE A, WANG J, ZHENG C, 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): 173-183.
- [25] SANCHEZ-GASCA J. Generic wind turbine generator models for WECC — a second status report[C]// 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, USA.
- [26] ELLIS A, MULJADI E. Wind power plant representation in large-scale power flow simulations in WECC[C]// 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA.
- [27] NUSSE H E, OTT E, YORKE J A. Border-collision bifurcations: an explanation for observed bifurcation phenomena [J]. Physical Review E, 1994, 49(2): 1073.
- [28] BERNARDO M, FEIGEN M, HOGAN S J, et al. Local analysis of C-bifurcations in  $n$ -dimensional piecewise-smooth dynamical systems [J]. Chaos, Solitons, Fractals, 1999, 10(11): 1881-1908.
- [29] DONDE V, HISKENS I A. Dynamic performance assessment: grazing and related phenomena [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1967-1975.
- [30] SASTRY S. Nonlinear systems: analysis, stability, and control [M]. Berlin: Springer, 1999.
- 
- 薛安成(1979—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:模型和数据驱动的电力系统稳定分析和安全防护、二次设备评估。E-mail: acxue@ncepu.edu.cn
- 王子哲(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:直驱风电场宽频带振荡特性分析。E-mail: 13261207167@163.com
- 付潇宇(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源电力系统稳定性分析。E-mail: 599164511@qq.com
- (编辑 鲁尔姣)

### Mechanism Analysis of Subsynchronous Oscillation in Direct-driven Wind Turbine Based on Non-smooth Bifurcation

XUE Ancheng, WANG Zizhe, FU Xiaoyu, WANG Jiawei, QIAO Dengke

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Recently, the oscillations with the interconnection of the large-scale renewable energy have received extensive attention. At present, the small signal model near the stable operation point, which ignores the nonlinear characteristics such as limits of converter, is very popular. In fact, the influence of the limits of the converter on the oscillation characteristics cannot be ignored under certain conditions. This paper reveals that one of the mathematical mechanisms of the subsynchronous band oscillation (SSBO) of the power system interconnected with direct-driven wind turbine is the non-smooth bifurcation related to oscillation limits with the phase portrait analysis. Firstly, the nonlinear non-smooth bifurcation theory related to the limits is introduced. Secondly, the limit links of the power system interconnected with direct-driven wind turbine and the subsynchronous frequency band oscillation phenomenon related to the limits is presented. And then, the influence of different limits on the characteristics of the SSBO is analyzed, and the phenomenon of saturation of the stator DC voltage limit is the main cause of the SSBO is revealed. Furthermore, the characteristics of SSBO with different short circuit ratios (SCRs) are analyzed and the non-smooth bifurcation caused by changing parameters is revealed. Finally, the effect of AC fault duration and grounding resistance on SSBO is analyzed, and the non-smooth bifurcation caused by initial value is revealed. The analysis shows that the SSBO in the power system interconnected with direct-driven wind turbine after the fault cleared is induced by multiple limits with a sufficiently large disturbance, which causes large deviation from the stable equilibrium point. Mathematically, the occurrence of the SSBO is corresponding to the non-smooth bifurcation in the dynamic system.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0902000) and National Natural Science Foundation of China (No. 51477050).

**Key words:** direct-driven wind turbine; limit link; non-smooth bifurcation; oscillation characteristic; AC fault

