

风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望

薛安成,付潇宇,乔登科,王永杰,王嘉伟

(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:风电参与的新型次同步振荡事故频发,严重影响了新能源电力系统的安全稳定运行。结合次同步振荡所对应的数学动力学模型、轨线特征,分析归纳风电参与的电力系统次同步振荡的机理分类,即负阻尼振荡、强迫振荡、切换型振荡和其他复杂振荡,并从参数变化角度给出对应的分岔类型;进一步地,基于上述风电参与的新型次同步振荡机理分类,分别阐述对应上述机理的分析方法研究现状;最后,针对目前研究较少的风电参与的切换型次同步振荡,从分段光滑模型及其动力学机理、非光滑分岔分析方法、物理特性、实测验证等角度,给出其研究展望。

关键词:次同步振荡;风电;切换型次同步振荡;非光滑系统;分岔;电力系统

中图分类号:TM 614;TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009023

0 引言

面对化石能源枯竭、环境污染和气候变暖问题,大规模开发利用风电、光伏等可再生能源,实施“两个替代”,实现全球能源变革转型,是应对当前能源问题的必由之路^[1]。随着“两个替代”的推进,源侧的大规模可再生能源通过电力电子变流器并网;网侧的柔性直流输电(VSC-HVDC)得到广泛应用^[2],呈现交直流混联的网络模式;负荷侧的多样化电力电子设备接入系统,使电力电子变流器在电力系统中的渗透率越来越高^[3]。电力系统正向高比例新能源发电和高比例电力电子设备的“双高”系统方向发展。

“双高”系统的稳定性问题不容忽视。特别地,电力电子设备间或与网络的动态交互作用可能会诱发宽频带振荡失稳现象^[4],其中的次/超同步频段振荡引起了学者的广泛关注。如2009年美国德州因输电线路故障导致风电场经高串补接入电网诱发频率为20 Hz左右的次同步振荡^[5];2012年以来河北沽源地区经串补送出的双馈风电场多次发生次同步振荡事故^[6];2015年新疆哈密地区直驱风电场经无串补线路送出的20~35 Hz范围的次同步频段振荡,经多级电网传播,最终引发附近火电机组的轴系扭振^[7];国内某双馈风电场经柔性直流并网示范工程中出现的导致系统停运的次同步振荡现象^[8]。种种事故表明电力电子设备,特别是风电接入系统,可能会带来次同步振荡问题,这给电力系统的安全稳定运行带来了极大的挑战。

目前关于风电参与的次同步振荡的研究,从参

与对象的角度看,大致可分为3类:一是双馈风机(DFIG)与串补电网的互作用,二是直驱风机与弱交流电网的互作用,三是电力电子设备之间的相互作用。第一类双馈风机与串补电网互作用引发的次同步振荡问题以美国德州和河北沽源风电场的次同步振荡事故为代表,重点关注风机的控制器与线路串补的动态交互,是一种新型的次同步控制相互作用(SSCI)^[9-10]。第二类直驱风机与弱交流电网互作用引发的次同步振荡问题以新疆哈密地区的次同步振荡事故为代表,属于风机与无串补的弱电网间的机网耦合型振荡。相较于串补电网,弱电网下往往更关注锁相环(PLL)动态造成的失稳^[11-12],锁相环锁相失败也可归于电力系统广义同步稳定性的范畴^[13]。第三类电力电子设备之间相互作用引发的次同步振荡问题包括多台风机之间的相互作用以及风机与其他电力电子设备间的相互作用问题。对于前者,现有文献大多采用大幅降低维数的风电场等值聚合模型,难以满足对于风电场内部具有差异的各台风机之间的动态交互的分析需求;对于后者,等值模型可用于分析风机与其他设备或与网络的互作用,比较典型的有风机与柔性直流输电^[14]和风机与静止无功发生器(SVG)等无功补偿装置^[15-16]的互作用所带来的振荡问题。现有研究表明,多设备之间存在复杂的耦合作用机制,系统存在多种不同频段的振荡模式,且各振荡模式之间相互耦合,耦合程度和振荡模式的稳定性均受多种控制参数和网络参数的影响。

另一方面,有诸多文献对次同步振荡问题的研究现状进行了归纳与总结。文献[7]基于振荡模式主导来源和机网互作用分类方式,提出了新的次同步谐振/次同步振荡形态分类方法。文献[17]按相互作用的对象对次同步振荡的产生机理进行了分类,总结了现有的研究方法与抑制措施并提出了展望。文献[18]分析了国内典型风电场的次同步振荡

收稿日期:2020-07-02;修回日期:2020-08-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902000, 2017YFB0902004)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902000, 2017YFB0902004)

事件的特点和机理,并基于运行实践的基础提出了研究思路和应对策略。文献[19]详述了典型的次同步振荡事故,并根据对象系统和分析方法进行了分类,文献[20]则对非线性系统的振荡模式进行了分类。文献[21]提出了“广义同步稳定性”概念,并讨论了大电网中各电源的失步机理及研究途径。

本文在总结现有风电参与的电力系统次同步振荡机理与研究方法的基础上,从数学机理角度对目前研究进行分类叙述,进一步地,从非线性动力学及分岔理论出发,对含风电的切换型次同步振荡的机理和分析方法提出了研究展望。

1 次同步振荡中的复杂现象

以新疆的次同步振荡事件为例,新疆哈密地区含有多座大型直驱风电场,经多条线路汇集后经哈密变电站输送至主网。2015年7月1日,北部的直驱风电场出现了持续的功率振荡,图1给出了事故中有功功率的振荡频率变化曲线以及相应频率范围内的火电机组扭振频率^[22]。

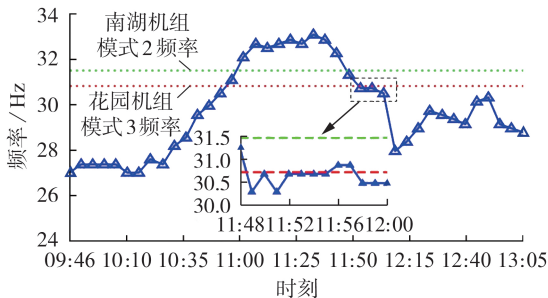


图1 振荡频率变化曲线

Fig.1 Variation curve of oscillation frequency

图1所示数据表明,系统的次同步振荡频率在27~33 Hz范围内随时间变化,具有明显的时变特征。振荡分量随后在多级网络中传播。当系统振荡频率在11:52—11:55时段穿越花园站的火电机组扭振模式时,激起了相应火电机组剧烈的轴系扭振。

结合其他典型的次同步振荡事件,分析结果表明风电参与的新型次同步振荡事件的复杂性体现为:①次同步振荡事故中的频率时变现象,主要表现为同一风电场各次不同频率的振荡事故和单次事故中振荡频率随时间的演化^[23];②振荡不再是局部而

是全局的振荡问题,且由于含电力电子设备的系统的强非线性及时变特性,使振荡分量的传播路径错综复杂,振荡源难以识别^[4]。

现有的阻抗法和特征值法在分析次同步振荡问题时,往往认为系统在某次/超同步频率下存在单一的振荡模式,当系统或控制参数变化时会导致该振荡模式阻尼变负,引起单一频率的发散的局部振荡。然而可能存在系统先出现负阻尼振荡,然后各类特殊非线性环节作用参与振荡,从而产生新的振荡模式的情况,从而使得振荡呈现时变或多模态混叠的特征。

值得注意的是,目前风电参与的次同步振荡研究大部分关注小干扰下的负阻尼振荡,对特殊非线性环节参与振荡的机理研究相对较少。考虑到目前风电参与的次同步振荡机理还未完全明确,本文分析并展望了风电参与的次同步振荡机理研究。

2 风电参与的次同步振荡的数学机理

数学上,含风电机组等多样化电力电子装置的电力系统是一个含离散变量的强非线性时变复杂动力系统。其中,电力电子装置自身具有时变拓扑特性^[3],其拓扑结构即使在静态工作点也会随着电力电子开关进行稳定切换;电力电子控制器中含有多种限幅和死区环节^[24];同时,电力电子设备的控制策略也会在系统遭受扰动时根据系统状态进行切换。此外,电力电子控制器中含有多时间尺度的控制环节^[25],不同控制环节相互耦合,相互作用,由此带来的次同步振荡必然是一个复杂的非线性振荡过程。

另一方面,从数学上看,风电参与的次同步振荡对应的数学解释主要有3种:一是负阻尼振荡,二是强迫振荡,三是切换型振荡(非光滑振荡)。其相应的分类如表1所示。

2.1 负阻尼振荡与光滑动力系统

对于负阻尼振荡,一般对应光滑的自治动力系统,在平衡点处存在实部为正的共轭复根(一般其他特征根实部均为负,理论上也存在其他特征根实部为0的特殊情况)。在小扰动下,系统初值处在该平衡点邻域内,此时由初值出发的轨线发散振荡,最终在平衡点外部形成稳定的极限环。特别地,对于平衡点双曲的光滑系统,从拓扑上看,其平衡点处的动

表1 振荡机理分类

Table 1 Oscillation mechanism classification

振荡机理	扰动类型	微分方程描述	振荡特征	分岔类型
负阻尼振荡	小扰动 大扰动	光滑自治动力系统	光滑极限环	Hopf分岔
强迫振荡	周期性的 强迫扰动	特殊的时变光滑动力系统 (自治系统+周期扰动)	光滑极限环	次谐波分岔
切换型振荡	大扰动	非光滑动力系统	非光滑极限环	非光滑分岔
其他复杂振荡	各类扰动	时变非光滑系统	奇异吸引子	多种分岔形式

力学特性等价于线性系统。因此,负阻尼振荡可利用平衡点处的线性系统来分析。

目前对次同步振荡问题的研究大多基于该负阻尼振荡的机理,其思想是通过线性化系统的稳定性来表征大的非线性系统的小干扰稳定性。另一方面,在大扰动下,系统也可能出现次同步振荡,此时振荡有以下2种情况:一是扰动后系统是负阻尼的,此时系统形成因负阻尼引起的发散振荡,等价于小扰动下的振荡;二是扰动后系统在局部可运行点是稳定的,但系统在大扰动后无法回到可运行的平衡点,反而在大范围内形成极限环。例如文献[21,26]中的非线性周期振荡,该振荡无法用运行点的负阻尼来解释。

从分岔角度看,对于一般光滑系统,若系统参数(包括网络参数和控制、运行等参数)连续变化,则其平衡点的一对共轭特征根由负变正穿越虚轴,从稳定平衡点衍生出稳定极限环,即系统出现 Hopf 分岔,对应动力学系统的振荡失稳。

2.2 强迫振荡与受扰系统

对于强迫振荡,对应自治动力系统叠加一个周期性的强迫扰动的光滑动力系统,其一般形式为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}(t) \quad \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为 n 维状态向量; $\mathbf{F}$ 为 n 维向量函数; $\mathbf{B}(t) = [B_1(t), B_2(t), \dots, B_n(t)]$ 为时变的周期扰动,其中 $B_i(t+T_i) = B_i(t)$, T_i 为扰动 $B_i(t)$ 的周期, $i=1, 2, \dots, n$ 。在电力系统分析中,一般采用的扰动为正弦函数形式,如 $B_i(t) = B_{0i} \sin(\omega_i t + \varphi_i)$, 其中 B_{0i} 为扰动幅值, ω_i 为扰动频率, φ_i 为初相位。

在周期性强迫扰动的情况下,非自治动力系统(式(1))可能出现周期解,对应系统振荡。对于高维扰动系统(式(1))中周期解的存在性证明常采用 Melnikov 函数法^[27]。

传统电力系统对强迫振荡的研究一般基于同步机的运动方程叠加正弦扰动展开,见式(2)。该二阶系统可直接通过求解得到系统稳态强迫响应,当扰动频率 ω 接近或等于固有频率 ω_0 时,系统出现共振。

$$\Delta \ddot{\delta} + K_1 \Delta \dot{\delta} + K_2 \Delta \delta = B_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

其中, δ 为发电机功角; K_1, K_2 为系数,具体可参见文献[28]。

对于次同步振荡,若将式(1)中的自治系统 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$ 改为对应的描述次同步振荡的微分方程,扰动为各类与次同步振荡相关的扰动,即可利用类似的理论来分析次同步振荡。

从分岔角度看,自治系统在周期性的强迫扰动下,系统由收敛至不动点到产生周期轨道,周期轨道进一步分裂成多个次谐波轨道(系统存在次谐波周期解),在力学中,此过程也称为次谐波分岔^[29-30]。

2.3 切换型振荡与非光滑系统

对于切换型振荡,对应含有切换的非光滑动力系统。非光滑系统因切换边界的存在,其动力学特征复杂,轨迹在切换面处可能发生弯曲、不连续和跳变等突然的跃迁行为^[31]。数学上,切换起作用时,系统局部的数学模型和空间描述发生改变,相当于从一个光滑系统切换到另一个不同的光滑系统。

切换型振荡和非光滑分岔示意图如图2所示。轨线切换导致的最简单的切换型振荡(跨边界极限环)如图2中的曲线2所示,具体描述如下:轨线从光滑区域 D_1 越过切换边界进入光滑区域 D_2 , 出现轨线在不同光滑区域中衔接的非光滑极限环(对应切换型振荡)。图2中在切换边界处的点 P_1 和 P_2 (连续但不光滑), 可视为不同光滑区域发生切换的标志。同时,切换型振荡也可能在切换边界上发展,最终离开切换边界,回到原来的光滑区域,形成非光滑极限环(如图2中的曲线1所示)。特别地,当系统含有多个切换时,系统轨线在多个光滑区域中切换,形成含有多个非光滑点的切换型振荡。

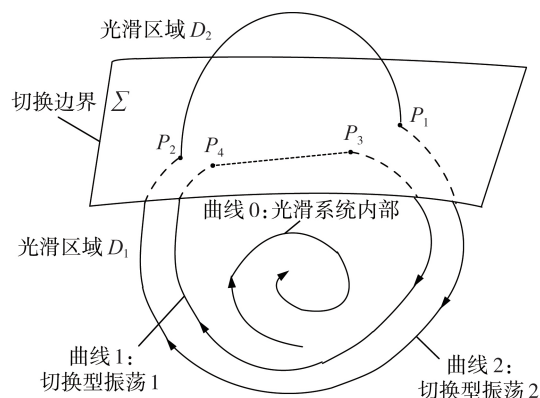


图2 切换型振荡和非光滑分岔示意图

Fig.2 Schematic diagram of switched oscillation and non-smooth bifurcation

从分岔角度看,随着参数变化,系统的大范围非光滑极限环(切换型振荡)出现或者消失,对应于非光滑分岔。需要注意的是,切换型振荡的轨线在不同的光滑系统间切换,对应着反映大范围动力学性质的非光滑极限环,和系统平衡点特性无特别对应关系,此时非光滑系统可以有稳定/不稳定平衡点,或者无平衡点。对于切换型振荡,基于平衡点局部特性的负阻尼和强迫振荡在理论上无法进行解释。

非光滑系统中目前研究较多的是分段光滑系统,典型的简单分段光滑系统可描述为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{cases} \mathbf{F}_1(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}) & H(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}) > 0 \\ \mathbf{F}_2(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}) & H(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{F}_i: \mathbf{R}^n \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^n$ ($i=1, 2$) 和 $H: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ 为关于状态变量 $\mathbf{x} \in D \subset \mathbf{R}^n$ (D 为定义域) 及参数 $\boldsymbol{\mu}$ 足够光滑的可微函数。切换边界 Σ 为:

$$\Sigma = \{x: H(x, \mu) = 0\} \quad (4)$$

Σ 将 D 分成2个区域:

$$S_1 = \{x \in D_1: H(x, \mu) > 0\} \quad (5)$$

$$S_2 = \{x \in D_2: H(x, \mu) < 0\} \quad (6)$$

在稳定性分析方面,对于不存在奇点的简单光滑系统,稳定平衡点的吸引域边界一般由不稳定平衡点和不稳定周期轨道的稳定流形构成^[32]。而在非光滑系统中,吸引域边界可能包含切换面(例如状态变量的限幅)上的某些点的集合^[33-34],或吸引域通过轨迹与切换面的互作用放大,从而造成稳定域结构相当复杂。

在分岔方面,非光滑系统除了会发生光滑系统所具有的分岔外(因为非光滑系统的子系统即为光滑系统),还会发生丰富的非光滑分岔,其中研究较多的是平衡点非光滑分岔和轨线非光滑分岔。在平衡点非光滑分岔方面,随着参数变化,各子系统的平衡点可能跨越切换边界,产生数目或性质的变化,从而形成如类鞍结分岔、类叉形分岔、边界穿越型(border-crossing)边界平衡点分岔 BEB (Boundary Equilibrium Bifurcation)、非光滑分折型(non-smooth fold)边界平衡点分岔^[35]等等。在轨线非光滑分岔方面,随着参数变化,轨线可能与切换面相交进而产生极限环(振荡)。根据轨线切换形式,非光滑极限环分岔有多种分类,具体可包括一般的C-分岔、滑动(sliding)分岔、擦边(grazing)分岔、类Hopf分岔和类同宿轨分岔^[35-38]等。

2.4 其他复杂振荡和复杂动力系统

对于更为复杂的情况,在系统遭受各类扰动(包括小扰动、大扰动、周期扰动、随机扰动等)的情况下,由于系统参数的复杂相互作用或非线性环节,可能出现各类分岔,例如鞍结分岔、倍周期分岔、环面分岔^[39-40],甚至使系统轨迹收敛到奇异吸引子,如混沌,此时系统可能会出现持续的无规则的振荡,从周期角度出发,可能表现为系统周期不断变化。

值得注意的是,非光滑系统的混沌振荡已有一些例子,如文献[41]表示非光滑系统在参数变化下,系统的吸引子可直接由平衡点变化为混沌吸引子。该现象不同于光滑系统,即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。

3 风电参与的次同步振荡研究方法现状

本节将结合风电参与的次同步振荡机理,综述其研究方法现状。

3.1 负阻尼振荡

在负阻尼振荡机理方面,目前的分析方法主要包括基于频域的复转矩系数法和阻抗法、基于时域的特征值法和短路比(SCR)分析方法等。

3.1.1 复转矩系数法

复转矩系数法是研究机电耦合交互作用诱发次同步振荡的主要方法之一。该方法将系统划分为电气和机械子系统,求出等效机械转矩系数和电磁转矩系数后,通过某个扭振频率下等效机械转矩系数和等效电磁转矩系数的实部之和的正负来判断该扭振模态的稳定性^[42]。目前该思想被大量应用到含风电的次同步振荡研究中。

文献[43]基于复转矩系数法分析了双馈风电场与串补相互作用引发的SSCI,认为转子侧换流器内环参数设置不当、高串补度以及低线路电阻会助增双馈风机的电气负阻尼,增大次同步振荡风险。文献[44]分析了柔性直流投运前后系统在轴系扭振模态附近的阻尼特性,并提出了柔性直流的混合式阻尼控制策略。文献[45]提出了一种基于含双馈风机系统的多输入输出闭环互联模型研究风电场与同步机轴系次同步互作用的改进复转矩系数法。文献[46]认为不同频段下定转子的电磁转矩阻尼之和决定了次同步谐振的稳定性,从电磁转矩的角度解释了双馈风机-串补系统的振荡机理。

复转矩系数法物理意义明确,从电气系统对机械系统的等效负阻尼角度揭示了轴系扭振机理^[47]。同时,研究表明由于风机轴系刚度系数较小,在正常串补度下不会激发扭振互作用^[48]。

3.1.2 基于状态空间模型的特征值法

基于状态空间模型的特征值法是一种时域分析方法,通过建立全系统的状态空间方程,从而求解线性化的状态矩阵的特征值与特征向量。特征值中的共轭复根蕴含着相应振荡模式的阻尼和频率,特征向量则可用于计算相关因子来表征状态量对振荡模式的参与程度,从而可为相应振荡模式的抑制提供依据^[49]。

文献[50-51]基于特征值法分析了双馈风机-串补系统中存在由风机控制主导的次同步振荡模式,且该振荡模式在低风速、高串补度和高SCR电流内环增益下变为不稳定。文献[52]认为负荷特性同样会影响双馈风电场-多串补的SSCI,且同步机的存在会减弱次同步振荡风险。文献[53]建立了2座子风电场的等值模型,并对比了其单台风机等值模型的次同步振荡特性的差异。文献[22]研究了直驱风机-弱交流电网的弱阻尼振荡模式,且在低SCR下该振荡模式不稳定,从而引发次同步振荡。文献[54]用特征值分析法研究了直驱风机变流器的控制参数对系统的SSCI的影响,并通过控制器参数优化的方法来抑制次同步振荡。文献[14,55]分析了直驱风机与柔性直流输电系统间的多频段的振荡模式,各振荡模式之间相互耦合,受多种参数影响,揭示了该系统复杂的交互作用机理。文献[56]认为海

上双馈风电场经柔性直流并网系统中存在不稳定的轴系扭振模式及装置互作用模式。文献[12]建立了含锁相环的双馈风机并网动态模型,揭示了低SCR和高风电场出力下锁相环主导的振荡模式的不稳定性。文献[15]研究了直驱风机与SVG的次同步交互作用。文献[57-58]基于开环模式谐振理论揭示了由风机控制环节间的动态交互作用引发振荡的机理。

采用特征值法能分辨出主导系统不稳定振荡模式的设备或控制环节,且能通过参与因子表征设备之间的互作用,是一种精确的分析方法。然而特征值法也有一定的局限性:对系统整体参数和模型的要求较高;在高维系统中难以得到具体特征值与各参数的表达式,只能采用数值分析;电力电子设备拓扑改变或控制策略切换时会造成状态矩阵的多变。

3.1.3 阻抗法

阻抗法将各电力电子设备或网络视为独立子系统,根据各自的控制结构和参数分别建立小信号阻抗模型,进而组成整个交互系统的线性网络^[59],从而利用奈奎斯特稳定判据^[60-61]或电路原理解释系统的振荡机理。根据阻抗建模方法的不同又可分为序阻抗建模^[62-63]和 dq 坐标系阻抗建模^[64-65]。

文献[66]建立了双馈风机经串补接入电网的系统阻抗模型,结合奈奎斯特图分析得到低风速、高串补度以及高SCR电流内环增益下系统具有次同步振荡风险。文献[67-68]认为双馈风机接入串补电网的次同步振荡问题中,线路串补使网络中存在构成“L-C”谐振回路的电路元件,而双馈风机转子侧电阻在次同步振荡频率下的负滑差和控制参数的共同影响下,其等效到定子侧的电阻为负,当克服网络的正电阻后会形成自激振荡。文献[69]认为弱电网下直驱风机在某一次同步频段下可等效为负电阻-电容串联的虚拟阻抗,与网络电抗构成“L-C”振荡电路,由此可解释直驱风机与弱电网互作用产生的次同步振荡问题。文献[70-71]分别建立了直驱风机 dq 坐标系导纳模型和序阻抗模型,且讨论了锁相环、电流环等控制参数和系统强度对导纳/阻抗特性的影响。文献[72]推导了模块化多电平变流器(MMC)交流侧和直流侧的小信号阻抗模型,并考虑了环流控制的影响。文献[73]建立了双馈风电场经柔性直流并网系统的阻抗模型,认为双馈风机在欠同步运行状态时具有“负阻,感抗”特性,和柔性直流风电场侧变流器(正阻,容抗)构成的虚拟谐振电路将引起次同步振荡。

设备的频域阻抗是其状态空间的外部表征,物理概念清晰,易于振荡源的识别,且阻抗聚合网络适用于大电网的振荡分析^[74],具有较强的工程价值^[75]。然而阻抗网络通过设备与网络阻抗的简单串

并联形成,无法分析设备间的动态交互途径。

3.1.4 基于SCR的评估方法

目前,广泛采用SCR(交流电网短路容量与电力电子设备额定容量的比值)^[76]来表征电力电子设备馈入交流电网时系统的相对强度,并用于判断是否有可能发生次同步振荡。本质上,SCR是一个可以判断光滑系统稳定性(是否含有不稳定共轭复根)的指标,与负阻尼是等价的,即线性系统的特征方程在控制策略和控制参数确定的情况下由SCR决定,将系统含有一对共轭虚根时的SCR称为临界短路比(CSCR),若系统的SCR大于CSCR,则有发生次同步振荡的风险^[77]。

通常认为在弱电网条件下($SCR < 3$),风电机组与电网或其他电力电子设备间耦合加剧,存在次同步振荡风险,如文献[78-79]研究了低SCR下锁相环自身以及与其他控制环节的强相互作用造成的小干扰稳定性问题。文献[80]基于系统特征方程分析了单馈入系统与小干扰稳定性间的关系,并进一步提出了表征多馈入系统小干扰稳定性的广义SCR指标。文献[81]提出了适用于一般运行条件的广义运行SCR,从而量化各运行方式下的小干扰稳定裕度。文献[82]提出了一种计及多风场因素的聚合SCR,从而反映风电场网架情况、子风电场交互作用以及控制系统对次同步振荡的影响。

3.2 强迫振荡

20世纪以来,电力系统对强迫振荡的传统研究主要集中于低频振荡^[28,83]。其机理可通过在单机系统原动机功率或电磁功率中叠加持续的周期性正弦扰动的运动方程来解释。目前,强迫振荡研究也扩展到风电系统参与的强迫振荡。

在理论研究方面,部分文献通过在风机的输入风速引入扰动来分析相应的强迫振荡。如文献[84]利用奇异值分解法分析了风电有功出现3倍风机旋转频率振荡时,强迫振荡分量在节点的分布情况以及风电接入点对节点频率响应的影响。文献[85]认为随机风速扰动下会诱发风电并网系统除固有频率外的强迫振荡新模式,并基于高阶统计量理论分析了新模式与固有模式的非线性耦合关系。文献[86]提出了基于传递函数的动态频率分析法,得到了双馈风机强迫振荡功率和风速波动的幅值之间的比例关系。文献[87]提出广义强迫振荡机理,即风速或风电功率波动频段覆盖了系统中的某些弱阻尼模式时,就会激发包含多种模式的强迫振荡。

部分文献通过在电气信号上增加强迫扰动来分析相应的强迫振荡。如文献[88]分析了在锁相环相位信号上叠加强迫干扰时,会导致风机输出功率的同频振荡,频率接近机电振荡频率时,会引发同步机的强迫振荡。文献[89]采用闭环传递函数分析了直

驱风机控制系统对次同步扰动的响应特性。文献[90]基于二阶动态响应推导了次同步扰动下的电压响应近似解。文献[91]基于次同步扰动的响应路径推导了双馈风机的多频率响应。文献[92]基于双馈风机定子间谐波电流解析模型分析了转子变流器侧扰动分量的传变规律。文献[93-94]提出了基于设备的暂态能量流评估元件阻尼特性,进而实现次同步强迫振荡源的定位。

3.3 切换型振荡

含风电的电力系统包含大量的电力电子设备,其拓扑结构具有时变特性,会随着电力电子开关进行切换,同时,在其动态中包含不同控制模式的切换和限幅饱和,是典型非光滑系统(分段光滑系统)。

上述非光滑切换,对系统稳定性有极大影响,主要表现在2个方面:一是切换或者限幅作用导致系统失去平衡点,造成小扰动失稳或者暂态失稳,对此文献[95-96]分析了逆变器并网系统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的2种复杂振荡失稳形式,文献[97-98]基于换流器的虚拟功角(VPA)特性,分析了大干扰下由电流限幅导致的失稳;二是切换或者限幅导致的切换型次同步振荡问题,如文献[26,99-100]基于非光滑分岔理论和时域仿真研究了风电参与的切换型次同步振荡现象。对于直驱永磁风机(PMSG)参与的切换型次同步振荡现象^[26],具体如图3和图4所示。图中,有功功率、网侧 q 轴电流参考值均为标么值。

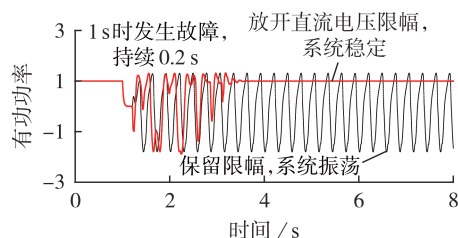


图3 PMSG系统时域仿真图

Fig.3 Time-domain simulative diagram of PMSG system

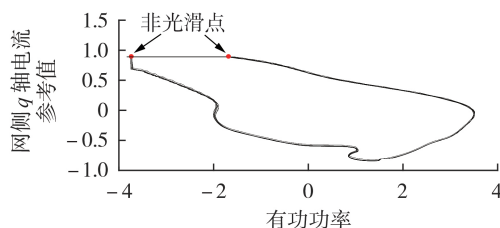


图4 PMSG系统相图

Fig.4 Phase diagram of PMSG system

仿真表明,直驱风机并网系统在交流故障后出现了持续的次同步振荡现象,如图3有功功率时域图所示,放开直流电压限幅环节,振荡消失,表明该限幅饱和是引起振荡的主要原因之一。进一步地,

图4表明该振荡在相图上表现为非光滑的极限环。

文献[99-100]分别研究了双馈风机并网系统在交流故障期间和交流故障后的切换型振荡。具体地,文献[99]表明故障期间的切换型次同步振荡由机侧换流器的电流限幅饱和引起,且不同控制参数下作用的限幅环节不同;文献[100]研究表明故障后可能出现由机侧和网侧的多限幅共同作用导致的周期变化的切换型混沌振荡。

从分岔角度看,随着参数的变化,切换型振荡的发生对应于系统发生非光滑分岔。文献[26]分析了直驱风机并网系统对SCR、交流故障程度等参数的非光滑分岔特性。文献[99]分析了双馈风机并网系统故障中的切换型次同步振荡对于PI控制参数、交流故障程度和短路容量等参数的非光滑分岔特性。文献[100]分析了双馈风机并网系统故障后的切换型混沌振荡对于SCR、交流故障程度以及风速等参数的非光滑分岔特性。

现有研究表明,含风电的电力系统切换型次同步振荡的现象具有以下特征:①诱发振荡的因素包括多样化电力电子设备(包括直驱/双馈风机、SVG)中的多种限幅等切换环节;②限幅等切换环节的作用形式复杂,振荡可能由单个或者多个切换(包括限幅饱和或者控制切换)引起,且切换的作用可能导致振荡特性的改变;③振荡的发生条件往往对应于多种参数的非光滑分岔。因此,切换型振荡特性复杂,未来还需进一步研究。

需要注意的是,在风电参与的次同步振荡方面,除上述提到的方法外,还有时域仿真法、幅相动力学分析法等。鉴于上述方法在其他综述中已有涉及,故本文不再赘述。

4 切换型次同步振荡分析的研究展望

结合上述分析可知,对于电力电子化电力系统的负阻尼型和强迫型次同步振荡,已有诸多研究,但对于切换型次同步振荡,对应着复杂切换系统的非光滑极限环,研究较少。

对于切换型次同步振荡,存在如下问题有待解决:首先,分析对象上,需要包含多样化电力电子设备的不同切换行为;其次,原理上,相关切换型振荡缺乏严格的数学证明;再次,研究方法上,现有的基于系统线性化模型的小干扰分析法无法分析大范围动力学的极限环;进一步地,在机理上,切换型次同步振荡涉及复杂参数作用下的非线性分岔行为和系统轨线与多切换面的互作用,其物理过程解释还不够清晰;最后,相关详细研究还需实际数据的支撑。

针对上述问题,下面提出含风电系统切换型次同步振荡的研究路径。

(1)模型方面。全面分析多样化电力电子设备

(包括风电机组、SVG、柔性直流等设备)的切换特性,包括控制限幅及死区、不同扰动下的控制策略切换以及保护电路等切换环节,从而建立含各类电力电子设备的分段光滑(非光滑)动力学模型。

(2)机理分析方面。探究分段光滑系统的各个区域内的子系统向量场的平衡点局部和大范围的动力学性质,进一步考虑系统切换,分析整体的非光滑系统的动力学性质,给出切换型振荡的机理解释;研究分段光滑系统的平衡点和轨线对应于可变参数的光滑与非光滑分岔类型及其分岔条件,揭示切换型振荡的分岔机理和发生条件。同时,对于与切换型次同步振荡对应的非光滑极限环的存在性证明,鉴于含风电的系统在4维以上,且Poincare-Bendixson环域定理(可用于2维系统极限环存在性证明)无法应用和Poincare映射在3维以上系统构造困难,故需另辟蹊径。

(3)物理特性分析方面,结合切换型次同步振荡的物理表现,分析其电气机理和特征。

(4)实测验证方面。收集模型的数模仿真数据或者实测数据,结合典型切换型振荡特性和形式,实现基于实测数据的切换型次同步振荡验证。

值得注意的是,风电参与的次同步振荡,其模型对应于时变的非光滑系统。而实际发生的振荡,可能始于负阻尼振荡,放大后出现非线性环节参与的振荡(包含切换型振荡),甚至拟周期混沌,即多种振荡可能交织在一起。基于实测数据,需要针对不同阶段的数据,区分相应的振荡。

5 结论

风电参与的新型次同步振荡问题的机理、形态和影响因素复杂,还需进一步研究。本文结合风电参与的次同步振荡背后的数学系统的动力学模型、轨线特征以及分岔类型,归纳出一种负阻尼型、强迫振荡型、切换型次同步振荡和其他复杂振荡的分类。进一步地,针对切换型次同步振荡,从分段光滑模型及其动力学机理、非光滑分岔分析方法、物理特性、实测验证等角度,提出了其研究路径和展望。本文可为从动力学的角度认识“双高”系统的次同步振荡,进而抑制复杂振荡提供参考。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110.
LIU Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110.
- [2] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入与换流站设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 58-62.
LI Fuzhong, ZHOU Min, HE Yanzhi, et al. Design scheme of system access and converter station of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 58-62.
- [3] 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.
- [4] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J/OL]. 中国电机工程学报. (2020-06-18)[2020-07-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191968>.
- [5] ADAMS J, CARTER C, HUANG S H. ERCOT experience with subsynchronous control interaction and proposed remediation [C]//PES T&D. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [6] WANG L, XIE X, JIANG Q, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [7] 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.
- [8] 吕敬, 董鹏, 施刚, 等. 大型双馈风电场经MMC-HVDC并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4852-4860.
LÜ Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4852-4860.
- [9] GARTH D, AMIT K, ANDREW L. Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems [C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [10] ANDRES E, JORGE A. Sub-synchronous interaction damping control for DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 419-428.
- [11] 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.
- [12] 刘巨, 姚伟, 文劲宇. 考虑PLL和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3162-3173.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3162-3173.
- [13] 徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. 南方电网技术, 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.
- [14] 周彦彤, 郝丽丽, 王昊昊, 等. 大容量风电场柔直并网系统的送/受端次同步振荡分析与抑制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 100-106.
ZHOU Yantong, HAO Lili, WANG Haohao, et al. Analysis and suppression of SSO at sending/receiving end in VSC-HVDC system connected large-capacity wind farms[J]. Electric Po-

- wer Automation Equipment, 2020, 40(3): 100-106.
- [15] 刘宇明, 黄碧月, 孙海顺. 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 Biyu, SUN Haishun. Study on subsynchronous interaction between D-PMSG-based wind turbines and SVG[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2072-2079.
 - [16] 薛安成, 吴雨, 王子哲, 等. 双馈风电场外送系统的中频振荡机理及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1245-1254.
XUE Ancheng, WU Yu, WANG Zizhe, et al. Mechanism and influencing factor analysis of medium frequency oscillation in sending power system connected with DFIG wind farms[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1245-1254.
 - [17] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡机理综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060.
 - [18] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
 - [19] 陈晨, 杜文娟, 王海风. 风电场接入引发电力系统次同步振荡机理综述[J]. 南方电网技术, 2018, 12(1): 84-93.
CHEN Chen, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Review on mechanism of sub-synchronous oscillations caused by grid-connected wind farms in power systems[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1): 84-93.
 - [20] 姜齐荣, 王亮, 谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1057-1066.
 - [21] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J/OL]. 电力自动化设备. (2020-07-15)[2020-07-20]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202008009>.
 - [22] 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.
 - [23] 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.
 - [24] 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.
 - [25] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467.
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467.
 - [26] 薛安成, 王子哲, 付潇宇, 等. 基于非光滑分叉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): 87-95.
XUE Ancheng, WANG Zizhe, FU Xiaoyu, et al. Mechanism analysis of sub-synchronous band oscillation in permanent magnetic synchronous generator based on non-smooth bifurcation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 87-95.
 - [27] AWREJCWICZ J. Smooth and nonsmooth high dimensional chaos and the Melnikov-type methods[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 60: 43-62.
 - [28] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 29-33.
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 29-33.
 - [29] 马永靖, 丁旺才. 碰撞振动系统四阶共振下的Hopf分岔和次谐波分岔[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 33-38.
MA Yongjing, DING Wangcai. Hopf and subharmonic bifurcation of vibro-impact system in order 4 resonance case[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 33-38.
 - [30] JING Z, ZENG X, CHEN Q. Harmonic and subharmonic bifurcation in the Brussel model with periodic force[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica(English Series), 1997(3): 289-301.
 - [31] BNARJEE S, VERGHESE G. Nonlinear phenomena in power electronics[M]. New York, USA: IEEE Press, 2000: 2-3.
 - [32] VENKATASUBRAMANIAN V, SCHATTLEH H, ZABORSKY J. Dynamics of large constrained nonlinear systems—a taxonomy theory power system stability[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1530-1561.
 - [33] VENKATASUBRAMANIAN V. Stability boundary analysis of nonlinear dynamics subject to state limits[C]//Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, HI, USA: IEEE, 2001: 1-6.
 - [34] JIANG X, VENKATASUBRAMANIAN V, SCHATTLEH H, et al. Basic structure of the dynamics with saturation limits on states[C]//Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control. Kobe, Japan: IEEE, 1996: 1103-1112.
 - [35] BERNARDO M, BUDD C, CHAMPNEYS A, et al. Piecewise-smooth dynamical systems: theory and application[M]. London, UK: Springer Verlag, 2008: 221-225.
 - [36] BERNARDO M, FEIGIN M, HOGAN S, et al. Local analysis of C-bifurcations in n-dimensional piecewise-smooth dynamical systems[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 1999, 10: 1881-1908.
 - [37] NUSSE L, YORKE J. Border-collision bifurcation including period two to period three for piecewise smooth system[J]. Physica D, 1992, 57: 39-57.
 - [38] BERNARDO M, BUDD C, CHAMPNEYS A. Normal form maps for grazing bifurcations in n-dimensional piecewise-smooth dynamical systems[J]. Physica D, 2001, 160: 222-254.
 - [39] 贾宏杰, 余贻鑫, 王成山. 电力系统混沌现象及相关研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 26-30.
JIA Hongjie, YU Yixin, WANG Chengshan. Chaotic phenomena in power system and its studies[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 26-30.
 - [40] 吴天一, 张正娣, 毕勤胜. 切换电路系统的振荡行为及其非光滑分岔机理[J]. 物理学报, 2012, 61(7): 30-37.
WU Tianyi, ZHANG Zhengdi, BI Qinsheng. The oscillations of a switching electrical circuit and the mechanism of non-smooth bifurcations[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(7): 30-37.
 - [41] BERNARDO D, NORDMARK A, OLIVAR G. Discontinuity-induced bifurcations of equilibria in piecewise-smooth and impacting dynamical systems[J]. Physical D: Nonlinear Phenomena, 2008, 237(1): 119-136.
 - [42] CANAY I. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine part I: theory [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,

- 1982,PAS-101(10):3630-3638.
- [43] 高本锋,李忍,杨大业,等. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):11-20.
GAO Benfeng,LI Ren,YANG Daye,et al. Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):11-20.
- [44] 王晓宇,杨杰,吴亚楠,等. 渝鄂背靠背柔性直流对系统次同步振荡特性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):188-194.
WANG Xiaoyu,YANG Jie,WU Yanan,et al. Effect analysis of back-to-back flexible HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid on sub-synchronous oscillation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):188-194.
- [45] 王一珩,杜文娟,陈晨,等. 基于改进复转矩系数法的风电场并网引发电力系统次同步振荡研究[J/OL]. 电工技术学报.(2020-06-18)[2020-07-02]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190690>.
- [46] 董晓亮,谢小荣,韩英铎,等. 基于定转子转矩分析法的双馈风机次同步谐振机理研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):4861-4869.
DONG Xiaoliang,XIE Xiaorong,HAN Yingduo,et al. Mechanism study of DFIG-related SSR based on separate stator and rotor torque analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(19):4861-4869.
- [47] 甄自竞,杜文娟,王海风. 强模式耦合现象中复转矩系数法和开环模式判稳方法的等价性[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2272-2279.
ZHEN Zijing,DU Wenjuan,WANG Haifeng. The proof of the equivalence of complex torque coefficient method and open-loop mode stabilization judgement method in strong mode coupling phenomena[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(8):2272-2279.
- [48] HUANG P,MOHAMED S,XIAO Weidong,et al. Subsynchronous resonance mitigation for series-compensated DFIG-based wind farm by using two-degree-of-freedom control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(3):1442-1454.
- [49] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:253-258.
- [50] HOSSEIN A,ENRICO S. SSR damping controller design and optimal placement in rotor-side and grid-side converters of series-compensated DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on sustainable energy,2015,6(2):388-399.
- [51] 王亮,谢小荣,姜齐荣,等. 大规模双馈风电场次同步谐振的分析与抑制[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):26-31.
WANG Liang,XIE Xiaorong,JIANG Qirong,et al. Analysis and mitigation of SSR problems in large-scale wind farms with doubly-fed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(22):26-31.
- [52] ANDRES E. Integration of DFIG-based wind farms into series-compensated transmission systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2016,7(2):451-460.
- [53] 高澈,牛东晓,罗超,等. 双馈风电场单机与多机等值模型对次同步振荡特性影响的对比[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):152-157.
GAO Che,NIU Dongxiao,LUO Chao,et al. Comparison of impact on sub-synchronous oscillation characteristics between single- and multi-generator equivalent model in DFIG wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):152-157.
- [54] 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 grid-connected PMSG system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):21-28.
- [55] LINASH P,BIKASH C,ROBIN G,et al. Stability analysis of a PMSG-based large offshore wind farm connected to a VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2017,32(3):1166-1176.
- [56] 边晓燕,丁杨,买坤,等. 海上风电场经VSC-HVDC并网的次同步振荡与抑制[J]. 电力系统自动化,2018,42(17):25-33.
BIAN Xiaoyan,DING Yang,MAI Kun,et al. Subsynchronous oscillation caused by grid-connection of offshore wind farm through VSC-HVDC and its mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(17):25-33.
- [57] DU W,WANG Y,WANG H,et al. Concept of modal repulsion for examining the sub-synchronous oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(4):4614-4624.
- [58] 王旭斌,杜文娟,王海风. 开环模式谐振引发含变速风电机组电力系统振荡的机理分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(22):6481-6491.
WANG Xubin,DU Wenjuan,WANG Haifeng. Oscillations caused by open-loop modal resonance in power system with variable-speed wind generator[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(22):6481-6491.
- [59] 陈新,王赞程,龚春英,等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):2082-2094.
CHEN Xin,WANG Yuncheng,GONG Chunying,et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(7):2082-2094.
- [60] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(11):3075-3078.
- [61] FAN L,MIAO Z. Nyquist-stability-criterion-based SSR explanation for type-3 wind generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2012,27(3):807-809.
- [62] 李奕欣,赵书强,马燕峰,等. 三相LCL型并网逆变器的阻抗建模及特性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):107-113.
LI Yixin,ZHAO Shuqiang,MA Yanfeng,et al. Impedance modeling and characteristic analysis of three-phase LCL-type grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):107-113.
- [63] VIETO I,SUN J. Sequence impedance modeling and analysis of type-III wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2018,33(2):537-545.
- [64] WEN B,BOROVEVICH 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.
- [65] 刘华坤,谢小荣,何国庆,等. 新能源发电并网系统的同步参考坐标系阻抗模型及其稳定性判别方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(14):4002-4007.
LIU Huakun,XIE Xiaorong,HE Guoqing,et al. Synchronous reference frame based impedance model and stability criterion for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(14):4002-4007.
- [66] MIAO Z. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2012,27(4):984-991.
- [67] XIE X,ZHANG X,LIU H,et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2017,32(3):1117-1126.

- [68] 张学广,邱望明,方冉,等. 双馈风电机组静止坐标系下阻抗建模及次同步谐振抑制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(6):41-48.
ZHANG Xueguang, QIU Wangming, FANG Ran, et al. Impedance modeling and sub-synchronous resonance mitigation strategy of DFIG based wind turbine in static reference frame[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 41-48.
- [69] 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.
- [70] 宋瑞华,郭剑波,李柏青,等. 基于输入导纳的直驱风电场次同步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(16):4662-4670.
SONG Ruihua, GUO Jianbo, LI Baiqing, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation in direct-drive wind power generation system based on input-admittance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4662-4670.
- [71] 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.
- [72] 吕敬,蔡旭,张建文. 模块化多电平换流器的交直流侧阻抗模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):131-136.
LÜ Jing, CAI Xu, ZHANG Jianwen. AC- and DC-side impedance models of modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 131-136.
- [73] 孙焜,姚伟,文劲宇. 双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡机理及特性分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(22):6520-6533.
SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu. Mechanism and characteristics analysis of subsynchronous oscillation caused by DFIG-based wind farm integrated into grid through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6520-6533.
- [74] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):26-32.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Small signal impedance admittance network modeling for grid connected renewable energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 26-32.
- [75] LIU H, XIE X, ZHANG C, et al. Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farms using aggregated RLC circuit model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 474-483.
- [76] IEEE. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities: ANSI/IEEE 1204-1997[S]. New York, USA: IEEE, 1997.
- [77] DONG W, XIN H. Small signal stability analysis of multi-infeed power electronic systems based on grid strength assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1393-1403.
- [78] ZHOU J, DING H, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [79] HUANG L, XIN H, LI Z, et al. Grid-synchronization stability analysis and loop shaping for PLL-based power converters with different reactive power control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 501-516.
- [80] 辛焕海,董伟,袁小明,等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices in-feed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [81] 王冠中,董伟,辛焕海,等. 基于广义短路比的电力电子多馈入系统小干扰概率稳定评估[J]. 电力系统自动化,2018,42(18):17-27.
WANG Guanzhong, DONG Wei, XIN Huanhai, et al. Probabilistic stability evaluation of small disturbances for power electronic multi-infeed system based on generalized short-circuit ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 17-27.
- [82] 毕天姝,李景一. 基于聚合短路比的大型风场次同步振荡风险初筛[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(5):52-59.
BI Tianshu, LI Jingyi. Risk screening of SSO induced in large-scale wind farms based on aggregated short circuit ratio[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 52-59.
- [83] 余一平,闵勇,陈磊,等. 周期性负荷扰动引发强迫功率振荡分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(6):7-11.
YU Yipin, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Analysis of forced power oscillation caused by continuous cyclical load disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 7-11.
- [84] 徐琪,徐箭,施微,等. 基于奇异值分解的含风电电力系统强迫振荡分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(18):4817-4827.
XU Qi, XU Jian, SHI Wei, et al. The forced oscillation analysis of wind integrated power systems based on singular value decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4817-4827.
- [85] 杨宏宇,吕万,吴熙,等. 基于双谱的风电引起强迫振荡模式相关性分析[J/OL]. 电测与仪表. (2020-06-18)[2020-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200526.15-26.004.html>.
- [86] 陈波,吴政球. 双馈感应风力发电机强迫功率振荡的频域分析法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):15-22.
CHEN Bo, WU Zhenqiu. Frequency domain analysis of forced power oscillation induced by doubly-fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 15-22.
- [87] 鞠平,刘咏飞,王红印,等. 电力系统的广义强迫振荡[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):1-6.
JU Ping, LIU Yongfei, WANG Hongyin, et al. General forced oscillations of power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 1-6.
- [88] 王志文,沈沉,刘锋. 不同锁相机制的双馈电机对电力系统小干扰稳定的影响分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6167-6176.
WANG Zhiwen, SHEN Chen, LIU Feng. Analysis on impact of doubly fed induction generations with different phase lock mechanism on power system small signal stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6167-6176.
- [89] 李景一,毕天姝,于钊,等. 直驱风机交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.

- [90] 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 grid-connected voltage source converter under subsynchronous disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 23-29.
- [91] 薛安成,吴雨,王子哲,等. 次同步扰动下的双馈风机系统多频率响应分析[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1804-1810.
XUE Ancheng, WU Yu, WANG Zizhe, et al. Analysis of frequency response of DFIG system under subsynchronous disturbance[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1804-1810.
- [92] 廖坤玉,陶顺,姚黎婷,等. RSC扰动分量与转差频率耦合引起的DFIG定子谐波电流解析模型[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1076-1083.
LIAO Kunyu, TAO Shun, YAO Liting, et al. Analytical model for DFIG stator interharmonic current induced by coupling of RSC disturbance components and slip frequency[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1076-1083.
- [93] 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.
- [94] 曹娜,赵旭,于群. 基于暂态能量流的双馈风电机组强迫振荡源定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 103-118.
CAO Na, ZHAO Xu, YU Qun. Forced oscillation source location of doubly-fed wind turbine based on transient energy flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 103-118.
- [95] 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.
- [96] YUAN H, XIN H, HUANG L, 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.
- [97] XIN H, HUANG L, ZHANG L, et al. Synchronous instability mechanism of P-f droop-controlled voltage source converter caused by current saturation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5206-5207.
- [98] HUANG L, XIN H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [99] XUE A, FU X, WANG Z, et al. Analysis of sub-synchronous band oscillation in a DFIG system with non-smooth bifurcation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 183142-183149.
- [100] 薛安成,付潇宇,王嘉伟,等. 双馈风机系统的切换型混沌振荡及其非光滑分岔特性[J/OL]. 电力自动化设备. (2020-07-29) [2020-08-02]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202009005>.

作者简介:



薛安成

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);

乔登科(1998—),男,河北邢台人,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: 695616191@qq.com)。

(编辑 李玮)

Review and prospect of research on sub-synchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation

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

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

Abstract: The frequent occurrence of new types of sub-synchronous oscillation involving wind power has seriously affected the safe and stable operation of the new energy power system. The mathematical dynamic model and trajectory characteristics are combined to summarize the mechanism classification of sub-synchronous oscillation of power system with wind power participated, namely, negatively damped oscillation, forced oscillation, switched oscillation and other complex oscillations. The corresponding bifurcation types from the perspective of parameter variation are provided. Furthermore, the research status of the analysis method with respect to the mechanism is described based on the above mechanism classification. Finally, regarding the switched sub-synchronous oscillation involving wind power that has not been widely studied, the research prospect is given in terms of piecewise smooth model and its dynamic mechanism, non-smooth bifurcation analysis method, physical characteristics and actual measurement verification.

Key words: sub-synchronous oscillation; wind power; switched sub-synchronous oscillation; non-smooth system; bifurcation; electric power systems