

电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径

徐 政

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:进入21世纪后,世界范围内对全球变暖的担忧迫使能源向低碳化和无碳化方向转型,可再生能源的开发利用发展迅猛,使得电网电源日益朝着非同步机化方向发展,导致电网电源之间的同步稳定性呈现出新的形态——广义同步稳定性。广义同步稳定性包含了同步机电源之间的同步稳定性、同步机电源与非同步机电源之间的同步稳定性以及非同步机电源之间的同步稳定性。为此,探讨广义同步稳定性意义上的失步机理及其研究途径。首先介绍了非同步机电源保持广义同步稳定性的基本手段。然后分析了广义同步稳定性意义上的3种失步类型,包括锁相环的锁相失败失步和功率同步环失步、非同步机电源由控制系统时延引起的失步以及同步机之间的功角失步。最后讨论了广义同步稳定性的分析方法,包括单独考虑1种失步类型时的分析方法和综合考虑所有失步类型时的分析方法;提出了从小系统到大系统步步推进的失步机理分析技术路线,指出了机电暂态模型不适用于分析广义同步稳定性的原因,阐明了基于全电磁暂态仿真分析电力系统广义同步稳定性是未来发展的趋势。

关键词:电力系统;非同步机电源;广义同步稳定性;锁相环;功率同步环;锁相失败;时延失步

中图分类号:TM 34;TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008009

0 引言

随着能源转型的不断发展,化石能源占比将不断下降,可再生能源特别是太阳能和风能占比将不断提高。太阳能和风能除了不可控和波动性两大特点之外,在电气特性上,基于主流技术的太阳能发电和风能发电,其区别于化石能源发电的最大特点是属于非同步机电源。太阳能、风能的不可控和波动性对大电网的功率平衡和能量平衡构成了重大挑战,需要采用有别于传统方法的功率平衡和能量平衡方法,如采用储能、负荷侧主动响应等;而太阳能和风能的非同步机电源属性,则对大电网的同步稳定性理论和实践构成了重大挑战。为了突出“同步机制”与同步机电源固有同步机制不同的非同步机电源的同步稳定性特征,文献[1-2]提出了“广义同步稳定性”的概念,以区别于纯同步机电源电网中同步机之间的传统“同步稳定性”的概念。广义同步稳定性具体包括以下3个方面:①传统的同步机之间的同步稳定性;②同步机电源与非同步机电源之间的同步稳定性;③非同步机电源之间的同步稳定性。

本文将对广义同步稳定性的物理机理及分析途径进行一个初步的探讨,相关内容按以下结构展开:第1节介绍非同步机电源的2种基本类型以及非同步机电源是如何与电网电源保持同步的;第2节从数学描述和外部表现2个方面探讨同步机电源与非同步机电源在“同步机制”上有何差别;第3节从广义同步稳定性是如何失去的这个角度出发,探讨了广义同步稳定性的失步类型,并总结得到3种失步

类型;第4节讨论了在只考虑1种失步类型的条件下,如何对小系统和大系统的广义同步稳定性进行分析;第5节探讨了同时考虑所有失步类型时,应采用何种方法来分析一般性系统的广义同步稳定性问题;第6节为全文总结。

1 非同步机电源保持广义同步稳定性的基本手段

非同步机电源可以分为电网跟踪型(grid following)换流器电源和电网构造型(grid forming)换流器电源^[1-2]。对于电网跟踪型换流器电源,其与电网电源保持同步的基本手段是采用锁相环(PLL)跟踪其交流母线电压的相位角^[3]。对于电网构造型换流器电源,其与电网电源保持同步的基本手段有2种:一种是采用PLL跟踪其交流母线电压的相位角^[3],或在作为无源网络的电源时直接给出相位角^[4];另一种是采用基于功率同步环(PSL)的功率同步控制(PSC)^[5]或虚拟同步机(VSG)控制^[6-7]保持与电网电源的同步。

对于采用PLL与电网电源保持同步的非同步机电源,其失去广义同步稳定性的关键因素是PLL锁相失败。图1给出了一种基于单同步旋转坐标变换的PLL(SRF-PLL)的原理图^[3]。其原理是将锁相同步问题处理为一个自动控制问题,即控制SRF-PLL的输出 θ 使 u_{sq} 跟踪其指令值 $u_{sq}^*=0$ 。小信号下的SRF-PLL控制系统框图如图2所示^[3]。

对于SRF-PLL,决定其性能的主要参数是PI控制器的参数 k_p 和 k_i ,当PLL失去稳定时就意味着PLL锁相失败,而PLL锁相失败就意味着该非同步机电

源的时延失步。而针对上述每一种失步类型,又可以分为小扰动下的失步和大扰动下的失步。综上,总结得到广义同步稳定性的失步类型如图4所示。

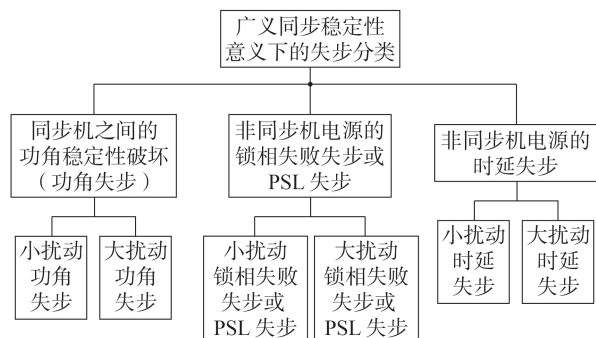


图4 广义同步稳定性的失步类型

Fig.4 Types of out-of-step for generalized synchronous stability

值得指出的是,上述3种失步类型之间是相互耦合的,即同步机之间的功角失步可能会导致非同步机电源的锁相失败或PSL失步;反之,非同步机电源的锁相失败或PSL失步,也可能导致同步机之间的功角失步。因此,对于实际大系统的广义同步稳定性分析,上述3种失步类型必须同时加以考虑。综上,传统同步机的“功角稳定性”与“广义同步稳定性”之间的关系可以用图5来表示。“广义同步稳定性”包含了“功角稳定性”,保持同步机之间的“功角稳定性”并不能确保整个系统的“广义同步稳定性”。换言之,传统同步机之间的“功角稳定性”仅仅是整个系统保持“广义同步稳定性”的必要条件。

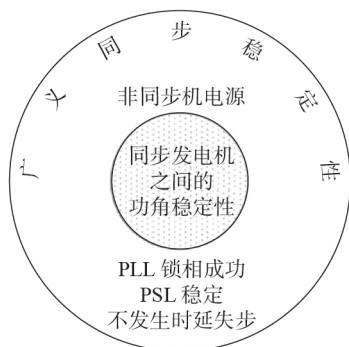


图5 传统同步机的“功角稳定性”与“广义同步稳定性”之间的关系

Fig.5 Relationship between “power angle stability” and “generalized synchronous stability” of traditional synchronous generators

为了便于揭示广义同步稳定性意义下的3种失步类型的主导因素,下面首先讨论仅考虑1种失步类型时的研究途径,而对于同时考虑3种失步类型的大系统的广义同步稳定性分析,将在第5节进行讨论。

4 仅考虑1种失步类型时的研究途径

如第3节所述,对于任何一种失步类型,都可以分为小扰动下的失步分析和大扰动下的失步分析。之所以要这么划分,根本原因在于小扰动下的失步分析对应的数学模型是线性模型,即在小扰动条件下电力系统可以用线性系统来描述^[13];而大扰动下的失步分析对应的数学模型是非线性模型,电力系统呈现为一个强非线性系统。对于线性系统,数学上已经有完全成熟的分析方法。电力系统工程界应用最普遍的线性系统分析法被称为模态分析法,本质上是矩阵特征值分析法,以及依赖于矩阵特征值分析的振型分析、参与因子分析和特征值关于矩阵元素的灵敏度分析等。对于非线性系统,数学上并没有万能的方法可以套用。电力系统工程界普遍采用时域仿真方法研究电力系统遭受大扰动后的暂态过程。而时域仿真方法又可以分为电磁暂态仿真方法和机电暂态仿真方法,关于2种时域仿真方法在分析广义同步稳定性时的适用性下文还会做进一步分析。电力系统在日常慢变过程中的行为可以用小扰动下的模型来模拟,而电力系统在故障等突变过程中的行为只能用大扰动下的模型来模拟。实际上,不管是小扰动模型还是大扰动模型,都还存在一个模型维数的问题。众所周知,对于高维数学模型,不管是线性系统模型还是非线性系统模型,得到其解析解都是非常困难的。因此,为了得到数学模型的解析解,通常只能对低维的数学模型进行研究。这反映在系统规模上,即小系统有可能采用解析方法进行分析,而大系统则只能用数值分析方法进行分析。因此,对于任何一种失步类型的研究,都可以划分为以下4个子问题进行研究:小系统小扰动问题、小系统大扰动问题、大系统小扰动问题和大系统大扰动问题。以往关于非同步机电源的同步稳定性问题,国内外主要集中在单个非同步机电源对系统电源的小扰动分析上,对小系统条件下的大扰动分析只有少量研究;而在大规模电力系统场景下,不管是小扰动分析还是大扰动分析,相关研究都仍非常少。

关于PLL锁相失败问题,在小系统小扰动条件下,国内外已有很多文献进行过相关研究,目前基于小系统小扰动条件的PLL锁相失败研究已经比较成熟^[14-19]。而在大扰动条件下,关于PLL性能的研究相对比较少^[20-22]。关于换流器控制系统各环节时延累积引起的失步振荡问题,相关研究还比较初步^[11-12]。另外,关于采用PSL的电网构造型换流器电源的广义同步稳定性问题,目前已有的结论是^[3]:稳态下能够保持同步稳定性,但在启动和故障情况下,存在失步风险。

综上所述,关于小系统条件下电力电子装置接入电网后的振荡问题,专家学者已进行过一些研究,但一般是将PLL和控制系统相结合进行综合考虑的,其研究结果存在2个方面的局限性:第一是不能区分由电力电子装置负电阻引起的振荡问题和由锁相失败或PSL失步导致的同步稳定性被破坏引起的振荡问题;第二是没有从大电网的角度出发考虑同步稳定性问题,仅仅考虑了单个装置相对于电网发生振荡的问题。而广义同步稳定性概念,是从大电网角度出发,考察所有电源之间的同步稳定性问题,其扩展了传统同步机之间的功角稳定性概念,明确了包含非同步机电源电网运行的基本约束条件。如何对大电网的广义同步稳定性进行分析,仍是目前电力工程界所面临的一个巨大挑战。

纵观同步机电源电力系统发展的100多年历史,每当有新技术出现时,对电力系统的影响分析都是遵循从小系统到大系统的这样一个认识过程。更具体地,通常采用解析方法分析新技术在单机-无穷大系统下的作用效果,然后再推广到多机大规模电力系统。这是因为对于单机-无穷大系统,严格的数学建模是可行的,对所有因素的分析都可以做得非常精细;而对于一般性的多机大规模电力系统,对相关因素的分析就要困难得多,通常只能采用模拟和仿真的方法,难以采用解析方法进行分析。

因此,对于广义同步稳定性几种失步类型的机理分析,可行的技术路线仍然是从小系统到大系统步步推进。首先设计得到尽可能有一般性意义的小系统,然后对该小系统进行严格并完整的数学建模,最后对所建的数学模型采用时域、频域等多种方法进行解析分析,找出影响失步的关键性因素。在此基础上,将所得结论在大系统上进行推广和验证,此时采用的分析工具主要为数字仿真方法。下面针对3种失步类型分别讨论仅考虑1种失步类型时的研究途径。

4.1 PLL锁相失败和PSL失步机理的研究途径

研究PLL锁相失败和PSL失步机理的小系统可以采用如图6所示的小系统或具有类似复杂度的系统,其中PLL可以采用如图1所示的SRF-PLL模型,PSL可以采用如图3所示的简单模型。

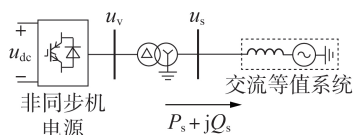


图6 研究PLL锁相失败和PSL失步机理的小系统模型

Fig.6 Small system model for analyzing phase lock failure of PLL or out-of-step of PSL

在选定小系统模型的条件下,将非同步机电源按照电网跟踪型换流器电源和电网构造型换流器电

源这2种类型,分别建立相应的待研究系统数学模型。在此基础上,采用合适的数学方法,包括时域分析方法和频域分析方法,对小扰动下和大扰动下的锁相失败和PSL失步机理进行解析分析。

对于采用PLL实现与电网电源同步的电网跟踪型和电网构造型换流器电源,需要开展的研究工作包括:分析PLL的运行原理和导致锁相失败的关键因素;分析锁相失败后系统的形态特征,包括PLL的运行特性、换流器的运行特性和其余交流系统的运行特性;分析故障清除后PLL恢复锁相的能力及其关键因素;提出避免或抑制锁相失败的措施。对于采用PSL实现与电网电源同步的电网构造型换流器电源,除了需要开展与采用PLL实现同步时的类似的分析工作之外,还需要分析PSL同步策略在启动和交流系统故障条件下的响应特性,特别是故障清除后PSL恢复锁相的能力及其关键因素,以及接入有源系统与接入无源系统2种情况下的不同特性。

在针对小系统的分析有明确的结论之后,需要将分析所得的结论推广到大系统,并在大系统中验证结论的适用性。对于大规模的电力系统,采用基于数学模型的解析方法几乎是不可能奏效的,因此相关研究结论在大规模电力系统中的验证研究,需要采用时域仿真方法。由于PLL和PSL的运行原理是基于三相电压和电流的瞬时值的,因此时域仿真模型必须采用电磁暂态仿真模型,而不能采用机电暂态仿真模型,这是因为机电暂态仿真模型只能取到三相电压和电流的正序基频相量值。时域电磁暂态仿真的基本步骤是首先在电磁暂态仿真平台上建立大规模电力系统的仿真模型,然后选择适当的方法对在小系统中得到的结论进行测试验证,确立具有普遍适用性的结论。

4.2 时延失步机理的研究途径

研究非同步机电源时延失步机理时,需要假定PLL或PSL的性能是理想的,即不考虑锁相失败或PSL失步问题,只考虑由控制系统各环节时延累积造成的非同步机电源与电网电源的等效失步效应。对于该研究,由于只考察非同步机电源控制系统的特性,因此采用小系统模型基本上就能解决问题。

综上,对于非同步机电源时延失步机理研究,采用的小系统模型与图6类似,研究的重点是建立非同步机电源控制系统各环节的模型,包括检测环节、控制器、执行环节的模型,并且应重点关注各环节的时延模拟。在建立了包括控制系统所有环节的小系统数学模型之后,仍然采用时域分析方法和频域分析方法对时延失步机理进行解析分析。由于考虑时延累积之后,即使对于小系统的数学模型,也可能会变得非常复杂,这种情况下需采用数值分析方法作为辅助手段。具体研究内容与考虑的场景可以参考

4.1节所述的技术路线,这里不再赘述。

4.3 锁相成功条件下影响同步机功角稳定性的关键因素研究途径

本节研究同样是假定PLL或PSL的性能是理想的,即在锁相成功的条件下研究影响同步机之间功角稳定性的关键因素。采用的技术路线仍然是用解析方法研究小系统,然后将得到的结论推广到大系统。小系统模型可以采用如图7所示的结构。该小系统描述了同步发电机gen向受端等值系统sys送电的一般性场景,而在送电通道中又有非同步机电源con接入并向受端等值系统sys送电。对于图7所示的小系统模型,所谓的“同步机功角稳定性”指的是同步发电机gen与等值系统sys之间的功角稳定性,而所谓的“关键影响因素”指的是非同步机电源con输出的有功功率 P_{con} 和无功功率 Q_{con} 。

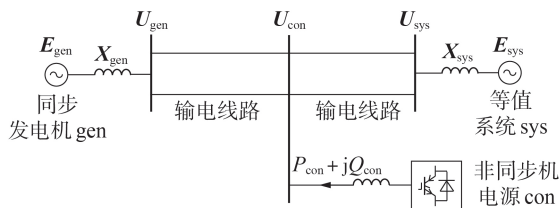


图7 用于研究锁相成功条件下影响同步机功角稳定性关键因素的小系统模型

Fig.7 Small system model for studying key factors affecting power angle stability of synchronous generators under condition of successful phase lock

因此,对于图7所示的小系统,研究锁相成功条件下影响同步机功角稳定性的关键因素,可以简化为研究非同步机电源con输出的有功功率 P_{con} 和无功功率 Q_{con} 在不同的变化模式下对同步发电机gen功角稳定性的影响。不管是在小扰动条件下还是在大扰动条件下,对于图7所示的小系统,是有可能采用解析方法进行分析的。值得指出的是,在上述解析法分析过程中,可以将非同步机电源con所采用的PLL或PSL理想化,即锁相总是成功的。

在得到了非同步机电源con影响同步机之间的功角稳定性的基本规律之后,可以将所得到的结论推广到更具一般性的大电网。可能的途径是将大电网中的所有同步发电机归为一个集合GEN,将所有非同步机电源归为另一个集合CON,研究集合CON中非同步机电源的有功和无功出力特性对集合GEN中同步发电机之间的功角稳定性的影响。在研究集合GEN中同步发电机之间的功角稳定性时,CON中的非同步机电源所采用的PLL或PSL假定是理想化的,即锁相总是成功的。由于研究的是集合GEN中同步发电机之间的功角稳定性,因此,可以采用机电暂态仿真程序进行仿真,其中电力网络采用正序基频代数方程模型。

5 电力系统广义同步稳定性分析的一般性途径

对于同步机电源与非同步机电源并存的一般性电力系统,保持广义同步稳定性是电力系统能够运行的必要条件,因此无论是在电网规划阶段还是在电网运行阶段,都需要进行电力系统广义同步稳定性的分析。与目前基于机电暂态仿真的传统同步稳定性分析不同,广义同步稳定性分析必须考虑对非同步机电源的PLL(或PSL)以及非同步机电源控制系统中各环节的时间延迟进行仿真,因此机电暂态仿真模型已不再适用,必须采用电磁暂态仿真模型才能实现。显然,随着非同步机电源在电网中的占比越来越高,PLL锁相失败和PSL失步发生的可能性是不能排除的,采用全电磁暂态仿真对电力系统广义同步稳定性进行分析将是必然的趋势^[23-25]。

而目前工业界广泛采用的机电暂态仿真软件(如PSS/E、PSASP等),用于分析电力系统的广义同步稳定性时,在数学模型上存在2个限制:第1个限制上文已经描述过,即正序基频相量模型难以模拟非同步机电源的PLL(或PSL)以及非同步机电源控制系统中各环节的时间延迟累积效应;第2个限制是非同步机电源和一般性的电力电子装置通常只在三相对称条件下才能得到其基频等效模型,在三相不对称条件下一般难以得到其基频等效模型,而机电暂态模型只考虑电气量的正序基频分量,因此无法模拟交流系统发生不对称故障下的机电暂态过程^[26]。综上,采用机电暂态仿真软件只能分析交流系统对称故障条件下同步发电机之间的功角稳定性问题,且必须假定PLL和PSL的性能是理想的,即不考虑PLL锁相失败和PSL失步。如果将电力系统广义同步稳定性分析所包含的内容用图8中的大圆来



图8 广义同步稳定性分析与功角稳定性分析之间的包含关系

Fig.8 Inclusion relationship between generalized synchronous stability analysis and power angle stability analysis

表示,将同步发电机之间的功角稳定性分析所包含的内容用图8中的小圆来表示,那么采用机电暂态仿真软件所能够分析的内容仅仅是图8中小圆中的阴影部分,且通过这种分析所得到的结论必须在3.3节所述的假设能够满足的条件下才能成立。

另外,尽管电磁暂态与机电暂态混合仿真的设想被提出已有几十年^[26-27],但由于数学模型上的难以兼容性,在理论上还没有创造出一种完善的混合仿真方法,故对其在广义同步稳定性分析方面的应用并不能抱太大希望。

6 结论

(1)随着非同步机电源在电力系统中的比例越来越高,采用传统的同步机之间的同步稳定性概念已不足以描述所有电源之间的同步稳定性问题。为了突出“同步机制”不同于同步机电源固有机制的非同步机电源的同步稳定性特征,需要采用“广义同步稳定性”的概念。

(2)非同步机电源与电网电源保持同步的基本手段有2种:一种是采用PLL,另一种是采用PSL。

(3)PLL锁相失败或PSL失步就意味着非同步机电源与电网电源之间失去广义同步稳定性。

(4)广义同步稳定性意义下的失步可以分为以下3种类型:同步机之间的功角稳定性破坏(功角失步);非同步机电源的锁相失败或PSL失步;非同步机电源的时延失步。

(5)随着非同步机电源在电网中的占比越来越高,采用全电磁暂态仿真分析电力系统广义同步稳定性将是必然的趋势。

(6)机电暂态仿真软件只能在假定PLL和PSL性能理想且交流故障为对称故障条件下才可用于分析发电机之间的功角稳定性,但并不能用于一般性电力系统的广义同步稳定性分析。

(7)广义同步稳定性的分析和控制是电力工业界面临的一个全新挑战,目前基于正序基频相量的分析和控制技术将难以支撑高比例非同步机电源电网的安全稳定运行,开发并建立与电网电源非同步机化相适应的规划、运行和控制技术体系已经是摆在电力工业界面前的一个根本性任务。

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[R/OL]. 北京:2019中国电机工程学会年会专题活动二“多端柔性直流输电技术专题研讨会”,(2019-11-14)[2020-05-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ZzhsCLu0JLQYeD63ZNFgOQ>.
- [2] 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.
- [3] 徐政,肖晃庆,张哲任,等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2017:116-118.
- [4] 管敏渊,徐政. MMC型柔性直流输电系统无源网络供电的直接电压控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):1-5.
GUAN Minyuan,XU Zheng. Direct voltage control of MMC-based VSC-HVDC system for passive networks[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):1-5.
- [5] ZHANG L,HARNEFORS L,NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(2):809-820.
- [6] BECK H P,HESE R. Virtual synchronous machine[C]//IEEE 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation-Barcelona. Barcelona,Spain:IEEE,2007:1-6.
- [7] GUAN M,PAN W,ZHANG J,et al. Synchronous generator emulation control strategy for Voltage Source Converter(VSC) stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(6):3093-3101.
- [8] ANDERSON P M,FOUAD A A. Power system control and stability[M]. 2nd Edition. Hoboken,NJ,USA:John Wiley & Sons, Inc.,2003:69-79.
- [9] WU H,WANG X. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,66(8):6473-6482.
- [10] TAUL M D,WANG X,DAVARI P,et al. An overview of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(10):9655-9670.
- [11] 李岩,邹常跃,饶宏,等. 柔性直流与极端交流系统间的谐波谐振[J]. 中国电机工程学报,2018,38(增刊):19-23.
LI Yan,ZOU Changyue,RAO Hong,et al. Resonance of VSC-HVDC with extreme AC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(Supplement):19-23.
- [12] ZOU Changyue,RAO Hong,XU Shukai,et al. Analysis of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(12):10157-10168.
- [13] 杨健,蔡晖,宋鹏程,等. MMC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.
- [14] ZHOU J Z,DING Hui,FAN Shengtao,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.
- [15] HUANG Yunhui,YUAN Xiaoming,HU Jiabing,et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2015,3(4):1193-1204.
- [16] HU J,QI H U,WANG B,et al. Small signal instability of PLL-synchronized type-4 wind turbines connected to high-impedance AC grid during LVRT[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2016,31(4):1676-1687.
- [17] HU J,WANG B,WANG W,et al. Small signal dynamics of DFIG-based wind turbines during riding through symmetrical faults in weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2017,32(2):720-730.
- [18] DU W,CHEN X,WANG H. Parameter tuning of the PLL to

- consider the effect on power system small-signal angular stability[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(1):1-8.
- [19] 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.
- [20] LUNA A, ROCABERT J, CANDELA I. Grid voltage synchronization for distributed generation systems under grid fault conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4):3414-3425.
- [21] HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4):3220-3228.
- [22] HE Xiuqiang, GENG Hua, MA Shaokang. Transient stability analysis of grid-tied converters considering PLL's nonlinearity [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2019, 4(1):40-49.
- [23] 徐政, 李宇臻, 肖晃庆, 等. 大规模交直流电力系统并行计算数字仿真综述[J]. 电力建设, 2016, 37(2):1-9.
- XU Zheng, LI Ningcan, XIAO Huangqing, et al. A review of parallel computing digital simulation of large-scale AC/DC power system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2):1-9.
- [24] 程改红, 陆韶琦, 邵冲, 等. 大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6):1919-1926.
- CHENG Gaihong, LU Shaoqi, SHAO Chong, et al. A high efficiency modeling method for electromagnetic transient simulation of large scale AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1919-1926.
- [25] 杨林超, 应超楠, 徐政, 等. 大规模交直流混联电网 RTDS 快速建模方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9):192-198.
- YANG Linchao, YING Chaonan, XU Zheng, et al. Rapid RTDS modeling method of large-scale AC/DC hybrid power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):192-198.
- [26] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2004:123-129.
- [27] 杨洋, 肖湘宁, 王昊, 等. 电力系统数字混合仿真技术综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3):203-210.
- YANG Yang, XIAO Xiangning, WANG Hao, et al. Review and prospect of power system digital hybrid simulation technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):203-210.

作者简介:



徐 政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术(E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems

XU Zheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: After entering the 21st century, the global warming concerns force the energy industry to transform towards the low-carbon and non-carbon direction. The development and utilization of renewable energy is developing rapidly, which makes non-synchronous generator sources replace synchronous generators increasingly in the power grid, resulting in a new form of synchronous stability among the power sources of grid-generalized synchronous stability. The generalized synchronization stability contains the synchronization stability between synchronous generator sources, the synchronization stability between synchronous generator source and non-synchronous generator source, and the synchronization stability between non-synchronous generator sources. So the out-of-step mechanism of generalized synchronous stability and its research approach are discussed. Firstly, the basic means of non-synchronous generator sources to keep generalized synchronous stability is introduced. Then, three types of out-of-step in the sense of generalized synchronous stability are analyzed, including the phase-locked failure out-of-step of the phase locked loop (or the power synchronization loop), the out-of-step of the non-synchronous generator sources caused by time delay of its control system, and the power angle out-of-step of the synchronous generators. At last, the analysis methods of generalized synchronous stability are discussed, including the analysis method when considering one type of out-of-step separately and the analysis method when considering all types of out-of-step together. The technical route to analyze the out-of-step mechanism is put forward, which firstly analyzes the simple system and then extends the results to the complex system. It is pointed out that the electromechanical transient model is not suitable for the analysis of the generalized synchronous stability and the future trend is adopting the full electromagnetic transient simulation to analyze the generalized synchronous stability.

Key words: electric power systems; non-synchronous generator source; generalized synchronous stability; phase locked loops; power synchronization loop; phase-locked failure; time delay out-of-step