

※“电力系统广义同步稳定性与宽频谐振稳定性”专辑

## 特约主编寄语

随着能源转型的发展,非化石能源占一次能源比重和电能占终端能源比重大幅度提升,同步机电源在电网中的主导地位已被打破,大量非同步机电源进入电网,导致电力系统的运行特性发生本质变化。在同步机电源与非同步机电源并存的交流电网中,保持所有电源为同一频率仍然是交流电网能够运行的必要条件。但其表现形式与同步机电源占主导的交流电网不同,仅同步机之间的“功角稳定性”已不足以保证同步机电源与非同步机电源之间是同频率的。非同步机电源一般由电力电子换流器控制,其与电网中其他电源保持同步的能力,并不是其固有特性而必须由控制器来实现。因此在同步机电源与非同步机电源并存的交流电网中,同步机电源之间“同步稳定性”的概念必须加以扩展,以包含“同步机制”不同的所有电源之间的同频率运行条件,将其称为“广义同步稳定性”。广义同步稳定性具体包括如下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。

正如同步发电机在次同步频段会呈现出负电阻效应一样,很多电力电子装置在一定的频段也会呈现出负电阻效应,例如某些非同步机电源尽管能够与电网电源保持同步稳定性,但其在一定的频段仍然会呈现出负电阻效应。当电力网络本身的固有电阻不足以抵消电力电子装置引起的负电阻时,原先谐振稳定的电力网络有可能变得谐振不稳定,从而导致过电压和过电流,并有可能与发电机转子轴系的机械扭振频率相互作用而发生电网复合共振,造成严重后果。此处,明确将由电力电子装置负电阻引起的以电力网络“固有谐振频率”振荡的电压、电流的衰减特性定义为电力网络的“宽频谐振 WBR (WideBand Resonance) 稳定性”。注意这里的“宽频谐振稳定性”与上述的“广义同步稳定性”是相互独立的技术概念。

之所以使用“宽频谐振稳定性”这个术语而不使用更一般性的“宽频振荡 WBO (WideBand Oscillation) 稳定性”这个术语,主要基于如下几点考虑。

(1)当电力系统遭受扰动后,电力网络进入电磁暂态振荡过程,其电压、电流响应除了基波频率的强制分量外,还包含有以“固有谐振频率”振荡的自由分量。在传统的机电暂态过程分析中,此种自由分量被认为是瞬间衰减的,从而可以忽略电力网络中的电磁暂态过程,电力网络可以用稳态下的代数方程来描述。而实际上在具有负电阻的电力网络中,遭受扰动后电力网络进入电磁暂态振荡过程,其电压、电

流响应中以“固有谐振频率”振荡的自由分量不见得一定会衰减。宽频谐振稳定性正是基于上述以“固有谐振频率”振荡的自由分量的衰减特性而定义的。

(2)由电力电子装置负电阻引起的宽频谐振属于在特定工作点上发生的振荡,在对应某一维度的时域波形上,表现为围绕一条恒定直线的上下波动,此处的恒定直线与特定工作点及其特定维度相对应。数学模型上,可以用对应特定工作点的线性化系统来描述。而对于线性系统,其响应特性完全由其特征值或称之为“振荡模式”所决定,特征值(振荡模式)包含实部和虚部两部分信息,实部对应于振荡模式的衰减特性,虚部对应于振荡模式的振荡频率。当振荡模式的实部为负时,表示该振荡模式是衰减的,从而是稳定的振荡模式,否则就是不稳定的振荡模式。当所有振荡模式都是稳定的振荡模式时,该线性系统就是稳定的。在电力网络中,特征值(振荡模式)的虚部是与网络的“谐振频率”相对应的,描述某个振荡模式稳定或不稳定指的是对应某个“谐振频率”的振荡是稳定的或不稳定的。因此使用“宽频谐振稳定性”这个术语就包含了电力网络振荡的频率信息,而使用“宽频振荡稳定性”这个术语并不能包含电力网络振荡的频率信息。

(3)宽频谐振稳定性概念可以理解是业界已形成共识的次同步谐振 SSR (SubSynchronous Resonance) 稳定性概念的扩展,即宽频谐振包含次同步谐振。次同步谐振涉及如下3个要素:第1个要素是存在安装有串补电容的输电线路;第2个要素是存在由串补电容引起的次同步频率电气谐振点(次同步的含义就是低于电网同步频率,另外具有串补线路的电网一定存在次同步频率的谐振点);第3个要素是电网侧的次同步谐振频率与发电机组转子轴系的机械扭振频率构成互补频率或接近互补频率(即电气谐振频率与机械扭振频率之和等于电网同步频率或接近于电网同步频率)。宽频谐振对次同步谐振概念的扩展主要体现在如下3个方面:第一,存在安装有串补电容的输电线路不是发生宽频谐振的必要条件,即宽频谐振可以在无串补输电线路的条件下发生;第二,宽频谐振频率覆盖从次同步频率到超同步频率的很大范围(理论上电网谐振频率点有无穷多个,谐振频率可以达到无穷大),但是发生宽频谐振不稳定的频率点通常在200 Hz 以内,因为在更高的频率下网络本身的固有电阻会大幅上升,足以抵消由电力电子装置产生的负电阻效应;第三,宽频谐振的频率点不需要与发电机组转子轴系的机械扭振频率有任何关系,即宽频谐振可以纯粹是电网侧

的谐振,独立于发电机转子侧的机械扭振。总之,“宽频谐振稳定性”的内涵可以包含“次同步谐振稳定性”的内涵。

(4)“宽频振荡稳定性”这个术语逻辑上应该理解为是“低频振荡 LFO(Low Frequency Oscillation)稳定性”和“次同步振荡 SSO(SubSynchronous Oscillation)稳定性”这2个术语的自然扩展。而实际上,低频振荡稳定性是同步发电机之间小扰动同步稳定性的另一种描述,其在电网中对应的电压和电流量仍然是基频分量。因此低频振荡与电力网络的“固有谐振频率”振荡没有任何共性之处,因而“宽频振荡”不能作为“低频振荡”在逻辑上的自然扩展。而当初业界引入的次同步振荡这个术语主要是描述装置对发电机转子轴系机械扭振的影响,典型案例是同步发电机带直流输电整流器负载。当同步发电机带直流输电整流器负载时,电网侧并不存在谐振回路,但同样会使发电机转子轴系机械扭振不稳定,原因是直流输电整流器为发电机转子轴系机械扭振提供了负阻尼。业界已形成共识的次同步振荡这个术语涉及如下2个要素:第1个要素是电网侧并不存在谐振回路;第2个要素是与发电机转子轴系机械扭振相关联,即次同步振荡所刻画的主要是发电机转子轴系的扭转振荡,其振荡的频率由发电机转子轴系机械扭振频率所决定。而由电力电子装置负电阻引起的电力网络振荡现象,第1个要素就是其振荡频率为网络的固有谐振频率;第2个要素是其独立于发电机转子的轴系机械扭振。可见,将“次同步振荡”这个已有明确固定含义的术语扩展成“宽频振荡”来描述由电力电子装置负电阻引起的网络振荡现象,由于两者内涵的完全不一致,逻辑上是矛盾的,因而“宽频振荡”不能作为“次同步振荡”逻辑上的自然扩展。这样,“宽频振荡”的内涵不能包含“低频振荡”的内涵,也不能包含“次同步振荡”的内涵。因此,采用“宽频振荡”这个术语缺乏逻辑性和合理性。

综上所述,对于由电力电子装置负电阻引起的以电力网络“固有谐振频率”振荡的电压、电流的衰减特性采用“宽频谐振稳定性”这个术语来描述比采用“宽频振荡稳定性”这个术语来描述更加精确和合理。显然,宽频谐振不稳定是电力系统不断电力电子化所面临的一个新的突出问题,而宽频谐振稳定性分析已成为电力系统规划和运行所必须考虑的一个项目。另外,对于不涉及同步发电机转子轴系机械扭振的所有网络谐振现象,不管是在次同步频段还是在超同步频段,不建议使用次同步谐振和次同步振荡这2个术语,这种情况下采用宽频谐振这个术语是更加合适的,原因是已得到业界公认的次同步谐振和次同步振荡术语一定是与同步发电机转子轴系的机械扭振相关联的。

为了应对能源转型对电力系统提出的挑战,促进“电力系统广义同步稳定性与宽频谐振稳定性”领域的研究工作并分享该领域的最新学术和技术成果,《电力自动化设备》编辑部精心策划和组织了本

专辑,我很荣幸被邀请担任本专辑的特约主编。经过严格评审,本专辑刊出论文28篇,分为3个栏目,其中栏目1为“广义同步稳定性的分析与控制”,栏目2为“宽频谐振稳定性的机理分析与控制”,栏目3为“低惯量系统频率稳定性的分析与控制”。下面对这3个栏目论文所关注的问题进行简要介绍。

广义同步稳定性的分析与控制栏目刊出论文14篇,主要关注的问题包括:(1)广义同步稳定性的失步类型和机理;(2)小扰动和大扰动下广义同步稳定性的分析方法;(3)薄弱电网下锁相同步方式的改进方法;(4)多个采用虚拟同步机控制的非同步机电源的协调运行;(5)非同步机电源渗透率对同步机之间功角稳定性的影响;(6)电力系统广域阻尼控制器的设计;(7)交直流混联电力系统暂态稳定性的能量函数计算方法;(8)电力系统失步条件下的切机切负荷策略。

宽频谐振稳定性的机理分析与控制栏目刊出论文12篇,主要关注的问题包括:(1)风电参与电力系统次同步振荡的机理分类;(2)次同步振荡在线检测和溯源定位;(3)锁相环控制对并网永磁直驱风机次同步振荡稳定性的影响;(4)基于自抗扰控制理论的直驱风电场次同步振荡抑制策略;(5)风电场内部不同风电机组间次同步振荡相互作用及其影响因素;(6)双馈风机系统切换型混沌振荡和低频谐振机理;(7)电力系统稳定器抑制由直流输电引起的次同步振荡的机理;(8)超导磁储能装置抑制 MMC-HVDC 系统直流侧振荡的机理;(9)三相 LCL 型并网逆变器的导纳建模方法和增强阻尼的控制策略。

低惯量系统频率稳定性的分析与控制栏目刊出论文2篇,主要关注的问题包括:(1)低惯量电力系统频率稳定性分析与控制方法;(2)双馈风电机组的虚拟惯量控制策略。

电力系统广义同步稳定性与宽频谐振稳定性是能源转型不断发展导致电力系统高度电力电子化过程中出现的新问题,是电力系统面临的重大技术挑战。关于电力系统广义同步稳定性与宽频谐振稳定性的理论研究和工程实践才刚刚开始,相关概念和术语还在不断进化之中,学术界还远远没有达成共识。本专辑的目的就是促进这一关键领域的学术探索和思维碰撞,为本领域的专家学者提供一个交流的平台。衷心感谢各位论文作者对本专辑的积极响应和大力支持,将最新的研究成果慷慨贡献于本专辑。感谢《电力自动化设备》编辑部为本专辑的策划、组织和出版所做的大量而细致的工作。同时,还要感谢本专辑的各位特约评审专家,正是他们严谨的态度和无私的奉献提升了本专辑论文的水平并保证了本专辑的高质量出版。最后期望本专辑能够对电力系统广义同步稳定性与宽频谐振稳定性的理论研究和工程实践起到促进和推动作用。

2020年8月23日