

# Studies of Sub-Synchronous Oscillation in HVDC System

Song Han<sup>1</sup>, Wanchun Qi<sup>2</sup>, Hui Cai<sup>2</sup>, Shan Gao<sup>1</sup>, Wentao Sun<sup>2</sup>, Fei Dou<sup>2</sup>, Xin Zhao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Jiangsu Electric Power Company Economic and Technology Research Institute, Nanjing Jiangsu

Email: songhanseu@foxmail.com

Received: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2016; accepted: Jun. 17<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

HVDC has been applied widely in power systems because it has some merits such as low loss, low line cost and so on. However, interaction between HVDC converters and turbine generator shaft system may cause subsynchronous oscillation (SSO) which threatens the safety and stability of power systems. This paper is intended to make a survey on SSO in HVDC by proceeding from the influence of HVDC on SSO and corresponding suppression strategy. The common methods of HVDC mathematical modeling are compared first. Secondly, the paper summarizes the effect of HVDC converter trigger modes, control modes and control parameters on SSO. The SSO characteristics of multiple HVDC and HVDC combined operation with series compensation or other electrical equipment is also introduced. Then the most common suppressing strategy that is installing a supplementary subsynchronous damping control (SSDC) in the constant current controller of rectifier is pointed out. And the design approaches of SSDC are compared. Besides, the influences of VSC-HVDC and HVDC system including wind power on SSO are presented. Finally, vistas of research are projected into the future.

## Keywords

HVDC, SSO, Suppression, Damping, VSC-HVDC, Wind Power

---

# 高压直流输电系统中次同步振荡研究综述

韩松<sup>1</sup>, 祁万春<sup>2</sup>, 蔡晖<sup>2</sup>, 高山<sup>1</sup>, 孙文涛<sup>2</sup>, 窦飞<sup>2</sup>, 赵欣<sup>1</sup>

<sup>1</sup>东南大学电气工程学院, 江苏 南京

<sup>2</sup>国网江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏 南京  
Email: songhanseu@foxmail.com

收稿日期: 2016年6月3日; 录用日期: 2016年6月17日; 发布日期: 2016年6月22日

## 摘要

由于高压直流输电(HVDC)技术有着损耗小、线路造价低等优点,在我国电力系统中被广泛采用。但HVDC与汽轮发电机组轴系相互作用可能产生次同步振荡(SSO),影响系统的安全稳定运行。本文以直流输电系统对次同步振荡的影响和抑制方法为立足点,对高压直流输电系统中次同步振荡研究进行综述。首先,比较了几种常用的HVDC数学建模方法。然后,总结了换流器触发方式、控制模式及控制参数等对次同步振荡的影响,并介绍了多直流运行、串补或其他电气设备与HVDC联合运行时的系统的次同步振荡特性。接着指出在HVDC整流侧的定电流控制器里附加次同步阻尼控制是一种最常用的抑制SSO的策略,并比较了常见SSDC的设计方法。本文还介绍了新型直流输电VSC-HVDC以及风电加入系统后对次同步振荡的影响。最后,结合电力系统的发展要求对高压直流输电系统的次同步振荡研究方向做出展望。

## 关键词

HVDC, SSO, 抑制, 阻尼, VSC-HVDC, 风电

## 1. 引言

自1954年世界首个直流输电系统(哥特兰岛直流工程)在瑞典投入运行以来[1],在世界范围内已有几十条高压直流输电系统投入运行。由于我国资源负荷中心呈逆向分布和HVDC技术的迅速发展,也已有多条直流输电线路运行。HVDC在远距离大容量输电中的应用大大加强了区域电网之间的互联,推动了西电东送和南北互供,促进了资源优化配置[2]。根据国家电网“十二五”规划,预计到2020年,我国直流输电工程约达27项,总容量超过60GW[3]。近年来,新型直流输电技术(VSC-HVDC)也在我国得到了广泛应用。

但HVDC及其控制器可能会与汽轮发电机组相互作用而引发次同步振荡问题。1997年在美国的Square Butte发电厂[4]发生了第一起HVDC的次同步振荡事故。之后美国的CU、IPP以及欧洲一些直流输电工程中也发现了次同步振荡现象。近年来随着HVDC技术在我国不断的应用,在盘南电厂、缓中电厂、伊敏电厂、上都电厂、锦界电厂等也出现了由直流系统的快速调节特性引起的不同程度的次同步振荡威胁[3]。因此,研究HVDC引起的次同步振荡问题具有重要的理论价值和实际意义。

高压直流输电系统次同步振荡问题的研究中,对HVDC系统的建模是分析的基础,准确分析系统的次同步振荡特性是关键,抑制SSO是最终目的。故本文首先介绍了HVDC的常用建模方法,紧接着分析了HVDC的触发方式、调控方式和控制器参数等对次同步振荡的影响。然后,比较了常用次同步振荡阻尼控制器的设计方法,简单分析了多HVDC和HVDC与其他电气设备共同作用时的SSO抑制。最后,总结了VSC-HVDC和风电经HVDC并网等新型电网形式对SSO的影响,并对高压直流输电系统的次同步振荡研究方向做出展望。

## 2. HVDC在次同步振荡中的建模

在高压直流系统中,对系统建模的准确与否直接影响到次同步振荡问题的分析结果。电力系统稳定

分析中，直流系统建模要求考虑换流器模型、交直流网络模型、交直流系统的接口和直流系统控制模型[5]。换流器在高压直流输电中起到及其重要的作用，承担着交直流相互转换的功能，是 HVDC 建模的重点。

在直流系统中对换流器一般采用准稳态模型。准稳态模型适用于对精度要求不高的暂态分析，具有计算模型简单，计算速度快等优点，在工程实际中得到广泛使用。但是准稳态模型忽略了电磁暂态过程，不能准确反映换流器两侧交流系统和直流系统间的频率变换特性[6]。次同步振荡问题需要考虑元件的电磁暂态过程，且计及的频带较宽，准稳态模型精度无法满足。

对准稳态模型改进的方法一般以动态相量法[7]-[10]和采样 - 数据建模方法[11] [12]为代表。动态相量法思想源于传统的平均法，是基于反映元件动态特性的状态变量对应的时变傅立叶系数而推导的一种建模方法[8]。文献[8] [10]应用动态相量模型分析了由 HVDC 引起的 SSO 现象。文献[6] [13]考虑晶闸管的死区特性和触发方式影响，采用改进的 HVDC 动态相量模型研究 SSO，结果表明改进后的动态相量模型具有较高的精度。动态相量模型是介于准稳态模型和详细电磁暂态模型之间的一种相量模型[5]。这种模型减少计算量的同时，可保持系统的非线性而较精确地反映系统的动态变化[8]。其模型是由各阶动态相量线性组合而成，当选取的阶数过多时，建模比较复杂，且该模型其不能正确反映不对称工作条件下高压直流系统的动态特性和换相失败现象[5]。

采样 - 数据建模方法是基于反映开关动态特性对换流器进行小信号线性化处理的一种建模方法。文献[11]建立了 6 脉冲换流器的采样 - 数据模型用于研究次同步振荡。文献[14]提出采用考虑触发控制小扰动延迟和触发方式影响的双桥 12 脉冲换流器的改进采样 - 数据模型。采样 - 数据模型扩大了准稳态模型的频带范围，在 HVDC 次同步振荡分析时具有很高的精度。但是，由于其进行了大量的线性化近似，在分析大扰动时不能很好地反映复杂的动态特性[5]。相比于动态相量模型，采样 - 数据模型精度更高，适用的频率范围更广，但采样 - 数据模型推导过程非常繁琐，不适合工程实际分析[6]。

综合来看，采样 - 数据法的精度最高，分析最为准确，但模型也最为复杂。在设计阻尼控制器时最好进行一定的化简，以减少计算时间，增强工程实用性。

### 3. HVDC 对次同步振荡特性的影响

HVDC 的快速控制是引起次同步振荡的原因。发电机轴上微小的频率扰动，将引起换相电压幅值和相位的波动，会使触发角相位发生偏移，从而造成直流母线电压、直流电流及功率产生波动。HVDC 控制系统响应这些变化进而影响到直流输送功率，并最终反馈到机组轴系，造成发电机电磁转矩的波动[15]。若电磁转矩的变化量和发电机角速度变化量之间的相位差超过 90 度，会出现负阻尼。而次同步振荡是否发生取决于该频率下的电气负阻尼与机械正阻尼的相对值。直流输电系统中，有很多因素影响电气阻尼，如运行方式、触发方式、控制方式以及控制器参数等。因此，研究这些因素对 SSO 的影响很有必要。

#### 3.1. HVDC 运行和控制方式对次同步振荡的影响

大量的实际与研究表明，HVDC 引起的 SSO 只需考虑整流站附近的发电机组，而不必考虑逆变站附近的发电机组[15]。其原因是常规负荷都有正频率调节效应，这种效应对次同步频率范围的功率振荡有正阻尼作用，而整流站作为负荷是一种刚性负荷，没有该效应对功率振荡往往起负阻尼作用，有可能产生 SSO；而逆变站相当于一个电源，其附近的发电机组并不向直流系统提供任何功率，而是与逆变站并列运行供电给常规负荷，另外，逆变站特性与常规负荷类似，因此，逆变站不会引起附近发电机组 SSO [16]。

HVDC 运行在不同运行工况下，控制系统的触发方式、控制方式以及控制器参数会影响电气阻尼特性。一般在正常工况运行时，整流侧作定电流或定功率控制，逆变侧作定熄弧角或定电压控制。此时，

整流侧控制系统对系统阻尼特性的影响来自两个方面，一为控制器本身的结构和参数，二为整流侧控制系统对与之相连的外部运行环境参数的改变的响应特性；而逆变侧控制系统需要配合整流侧的运行，其阻尼的影响主要由 HVDC 系统整流侧和逆变侧的控制器结构和参数决定，而对与之相连的外部运行环境参数改变的响应不明显[17]。

### 3.1.1. 换流器触发方式对次同步振荡影响

换流器触发相位控制是直流输电控制系统中改变换流阀的触发相位，实现直流输电系统及其换流装置运行状态调节的控制环节，有等触发角控制和等相位间隔控制两种控制方式[18]。等触发角控制又称按相触发控制。它的特点是：换流器的每一个换流阀都有各自分开的触发相位控制电路，直接以加在每个阀上各自的交流电压为参考[18]。由于经常发生谐波不稳定，这种控制方式目前已不在工程中采用。等相位间隔触发又称为等间隔触发。它与按相触发的不同在于它不以保证各阀触发角相等为目标，而是保证相继各触发脉冲时间的等相位间隔。由于触发脉冲间隔相等，产生的非特征谐波很有限，克服了按相控制的主要缺点，因此工程上普遍采用按相触发方式[18]。文献[19]计算结果表明，采用等间隔触发方式的 HVDC 输电系统比采用按相触发方式更容易引起不稳定的轴系扭振。

### 3.1.2. 换流器控制方式对次同步振荡影响

直流输电调节系统有四种基本调节方式：定电流调节，定功率调节，定电压调节和定熄弧角调节。除了基本调节方式外，直流输电系统还常常附加限制措施，如为了保证系统的正常运行，在整流侧附加最小触发延迟角控制，在逆变侧附加最小熄弧角控制[19]。在交直流输电系统中，为了利用直流输电的快速调节能力，来提高交流系统的动态能力，常常需要在换流器的调节器中增加专门的附加控制。无论采用哪种触发方式，整流侧采用定功率调节时，系统发生不稳定轴系扭振的可能性都比其采用定电流调节时的大[19]。文献[20]表明定功率控制比定电流控制在低频范围内有更大的负阻尼，并且非线性定电流控制比线性定电流具有更好的正阻尼特性。文献[16]得到相似的结果，定功率控制、定熄弧角控制相对于其他的控制方式是一种更易诱发扭振的控制组合。文献[21]得出，对于 AC/DC 并联系统，当逆变侧交流系统较弱时，逆变站两种基本控制方式(即定电压控制、定熄弧角控制)对电气阻尼的作用差别甚大，逆变站采用定熄弧角控制时更易激发低频振荡。

### 3.1.3. 控制系统调节器参数对次同步振荡影响

直流换流器控制系统的放大倍数及时间常数在不同的扰动频率时会对系统电气阻尼系数的产生一定影响，对于某些放大倍数，时间常数的值，将会造成系统在某些频域内呈现负阻尼，当直流输电的调节器参数整定不当时，可能引起机电扭振相互作用导致的扭振不稳定。无论采用哪种触发方式，随着整流侧定电流调节器增益的增大或时间常数的减小，发电机组发生不稳定轴系扭振的可能性都会增大[19]。文献[21]得出，随着整流站控制比例系数  $K$  的增大或时间常数  $T$  的减小，所产生负阻尼的频率将从低频范围向高频范围扩展，并且对于不稳定的扭振模态，单纯减小  $K$  或增大  $T$ ，并不一定总能改善该模态下的电气阻尼特性。

### 3.1.4. HVDC 在非正常工况下运行对次同步振荡影响

HVDC 不同的运行工况可能影响系统和相关发电机组轴系之间相互作用的强弱程度。直流输电系统有时会出现非正常工况。比如，当系统处于整流侧定最小触发角  $\alpha_{\min}$  及逆变侧定电流运行方式时，一般发生在整流侧交流电压过低或逆变侧交流电压过高的条件下。

在非正常状态下运行时，由于 HVDC 控制系统逐渐丧失了对运行方式的调节裕度，其不再响应外部运行环境参数的改变，此时系统的阻尼特性曲线主要由控制系统在不同控制方式下的结构参数决定[17]。

高压直流输电系统正常运行下的传输功率大于非正常运行方式下的传输功率。故 HVDC 系统在正常运行工况下较非正常运行工况而言，对系统阻尼特性的影响更大，在更宽的频带范围内呈现出更负的阻尼值[17]。文献[19]计算结果表明，直流输电线路输送功率的增加将使发生不稳定轴系扭振的可能性增大。

### 3.2. 多 HVDC 对次同步振荡的影响

随着我国直流输电工程的发展以及西电东送和全国联网的全面实施，多回直流输电线路落点同一交流系统的情况将越来越普遍，因此研究这种情况下发电机组的 SSO 问题，在理论上和工程实用上都具有重要意义[22]。与仅含单个直流换流站系统相比，落点于同一交流系统的直流换流器数目越多，有可能影响临近同步发电机组电气阻尼的因素也越来越多，例如交直流系统的网络结构，直流子系统各自的控制方式以及控制器参数，直流子系统控制器之间的协调程度等。

文献[22]将机组作用系数的概念推广到包含多个直流换流站的直流输电系统，结果表明：对于含有多个直流换流站的交直流系统，应该计算所有直流线路的机组作用系数，并采用综合机组作用系数来判断系统中发电机组次同步振荡的危险性。

### 3.3. HVDC 与串补并联运行时的次同步振荡

在远距离、大容量输电中，广泛采用 HVDC 技术和串联补偿技术。而 HVDC 和串联补偿都有可能引发次同步振荡现象。二者引发 SSO 的机理不同，HVDC 系统中，SSO 是由于直流控制器的快速响应引起的[23]，而串联补偿的 SSO 是由于谐振现象引起的。但随着大区域电网互联，将出现很多带串补的复杂交流混合系统。SSO 将由二者共同引起，二者相互作用使次同步振荡问题更复杂。

在交直流混合系统中，HVDC 引起的 SSO 问题与整流侧机组和交流电网联系的强弱有关[24]；随着固定串补装置的增加，系统发生次同步振荡的危险越大；当串补度过小，次同步振荡现象由 HVDC 系统引起[25]。实际交直流系统中，通常在交流线路适当增加可控串联装置(TCSC) [24] [26] [27]的补偿度来提高电气阻尼特性。文献[27]仿真结果表明，考虑串补装置对系统次同步振荡的影响，交直流混合弱联网运行方式发生次同步振荡风险大于交直流混合强联网运行方式。

### 3.4. HVDC 与其它电气设备共同影响次同步振荡

电气设备(如 FACTS 装置等)或直流输电系统都有可能引起发电机组与电网之间不良的相互作用从而导致次同步振荡。不管是由 FACTS 引起的次同步振荡问题还是由直流输电引起的次同步振荡问题，国内外学者都已经进行了大量的研究，但绝大多数研究工作都是针对一种情况，即单独考虑 FACTS 装置的作用，或只研究直流输电系统对同步发电机组的作用，而二者引起次同步振荡的机理是不同的，因此当含有 FACTS 装置的交流输电线路与直流输电系统并列运行时，它们之间的相互作用使得次同步振荡问题更加复杂。

文献[24]考虑了 TCSC 和 HVDC 对系统次同步振荡阻尼特性的相互影响，对比结果得出，联网运行时改善了交流线路及 HVDC 单独运行时局部频率为负值的情况；TCSC 不仅改善了交流线路的次同步振荡稳定性，也改善了 HVDC 的次同步振荡稳定性，提高了系统的整体稳定性。

## 4. 高压直流输电系统中次同步振荡的抑制

### 4.1. 次同步振荡阻尼控制器

高压直流系统中，普遍采用附加次同步振荡阻尼控制器(SSDC)来抑制 HVDC 引起的 SSO。HVDC 引起 SSO 的本质原因是 HVDC 的定电流控制器具有快速控制特性，从而会引发系统在次同步频率围内产

生负阻尼[25]。因此，在 HVDC 整流侧的定电流控制器里附加次同步阻尼控制器来抑制 SSO 是一种简单有效的方式。SSDC 抑制的原理是在 HVDC 定电流控制环节的参考电流上叠加一个与汽轮发电机组轴系扭振频率相同的量，通过适当的相位矫正和增益调节后为发电机提供一个附加的正电气转矩使得发电机总的电气转矩增强，从而抑制汽轮发电机组的次同步振荡[28]。其具有控制效果好、能耗低、价格低和可靠性一般比一次设备高等优点[29]，已用于国内实际高压直流系统的有绥中直流系统、呼辽直流系统等。

SSDC 补偿环节按对模态频率范围补偿可分为多通道和单通道模态相位补偿。多通道相位补偿法能单独对每个模态进行较为精确提取并抑制[30]，可以显著提高控制模态的电气阻尼，但是计算量较大，而且当整流站附近发电机组较多时，多通道设计使控制系统变得非常复杂。单通道相位补偿法计算量较小、结构简单、考虑了所有的振荡模态，提升了所有发电机组的阻尼，适合运用到实际工程中，但是，其可以提供的正阻尼不多，而且补偿的相位需要综合考虑所有模态频率，其设计需要细致的优化算法。文献[31]-[33]采用了基于相位补偿原理来设计 SSDC 设计。图 1 为多通道 SSDC 结构示意图。

除了采用提高电气阻尼来设计 SSDC 外，有些文献也基于特征值来设计 SSDC。文献[34]基于经典线性控制理论中的模态调节方法，预先设定闭环系统在次同步模态的特征值，以求取 SSDC 的参数。基于特征值的设计方法是一种严格的、准确的、基于线性系统理论的方法，但次同步振荡问题涉及的模态较多，系统阶数较大，容易引发“维数灾”问题。

针对这个问题，有学者采用 Prony 算法来设计 SSDC。Prony 算法可直接从时域仿真数据或实测数据得到系统的等值线性模型，无需列大量的方程和建立详细的模型，避免了“维数灾”，为在复杂系统中设计控制器提供一条较好的途径[32]。但是，Prony 法的拟合结果对噪声敏感，且对系统实际阶数辨识效果不理想，有定阶困难，传递函数阶数较高的缺点，难以在实际工程中运用。文献[32] [35]利用 Prony 算法设计了 HVDC 附加次同步阻尼控制器。

SSDC 设计时大多数针对特定的运行方式，当运行状况发生较大变化时，很难满足抑制 SSO 的要求。此时可采用优化算法来控制器参数，使其在多种运行状态下的电气阻尼或特征值均满足要求。文献[36]采用遗传算法来解决 SSDC 控制器参数优化中的极大极小值问题，虽然具有设计简便、智能化程度高等优点，但系统规模受到限制且属于随机类算法，可靠性较差。为此，可基于鲁棒性要求来设计 SSDC。 $H_{\infty}$  控制理论是目前解决鲁棒控制问题比较成功且比较完善的理论体系[32]。 $H_{\infty}$  鲁棒控制理论设计的 SSDC 可以将系统运行方式的改变视为模型的不确定，对外部扰动不敏感，保证了控制器的鲁棒性。文献[32] [37]基于  $H_{\infty}$  控制理论设计了 SSDC，但是系统较简单，对于复杂的交直流系统，很难实际运用。

有些文献还运用其他的 SSDC 设计方法。文献[38]将输出反馈控制理论运用到直流附加次同步阻尼控制中来达到抑制效果。文献[39]从系统状态方程角度出发提出基于射影定理进行降阶处理来设计 SSDC。

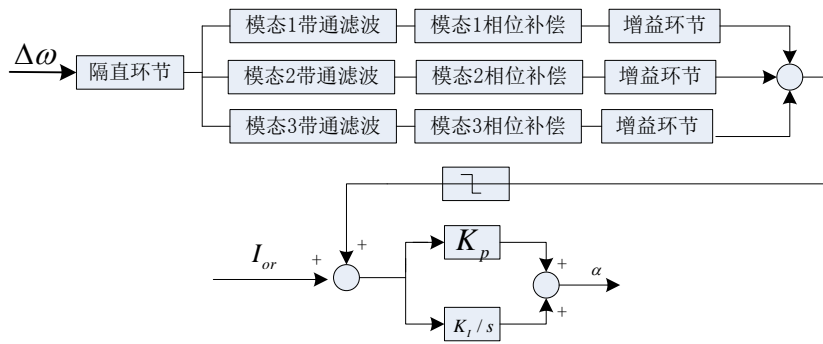


Figure 1. Multi-channel SSDC system chart

图 1. 多通道 SSDC 系统框图

## 4.2. 多 HVDC 抑制次同步振荡

多高压直流输电系统中, 由于每台换流站除了与附近的发电机组相互作用之外, 还要考虑各换流站彼此之间的相互影响。配置在换流站处的多台附加次同步阻尼控制器要综合考虑控制, 不能简单地考虑单一 SSDC 作用, 需要对每台 SSDC 进行参数整定和协调控制, 这样才能使抑制次同步振荡效果达到最佳。

文献[40]以贵州电网多 HVDC 为背景, 对 SSDC 与附加励磁阻尼控制器(SEDG)的协调控制, 以及多台 SSDC 之间的协调控制进行了大量的仿真研究。得出, 在多 HVDC 输电系统中, 装在直流换流站处的多台 SSDC 的整定将不再是一个孤立的问题, 需要进行协调控制和参数选择, 才能实现对 SSO 现象最有效的抑制。

## 4.3. HVDC 与其它电气设备联合抑制次同步振荡

电气设备(如 FACTS 装置等)或直流输电系统中的 HVDC 附加次同步阻尼控制器都可以在一定程度上抑制 SSO。国内外学者大多数研究工作都是针对一种情况, 即单独考虑 FACTS 的抑制作用, 或只研究 HVDC 中的次同步阻尼控制器抑制作用。而当交直流系统同时含有 FACTS 装置和 HVDC 采用 SSDC 时, 二者之间的相互作用会使整体抑制次同步振荡效果更为复杂。

文献[41]对于某一交直流系统, 直流整流侧配置有 SSDC, 结果表明按抑制次同步振荡设计的 SVC 和 STATCOM 都有良好的抑制能力, 以 STATCOM 型抑制效果最好。文献[29] [42]都对交直流系统采用 SSDC 和 SEDG 共同抑制 SSO, 仿真结果表明, 同时使用 SEDG 和 SSDC 比单独使用二者时有更好的抑制 SSO 的效果。

## 5. VSC-HVDC 对次同步振荡的影响和抑制

基于电压源型换流器的高压直流输电技术(VSC-HVDC), 由于采用了全控型电力电子器件和脉宽调制技术, 具有运行方式灵活, 有功无功独立控制等优点[43], 其应用越来越广泛, 所以研究其对 SSO 的影响是很有必要的。次同步振荡的实质为有功功率的振荡, 而 VSC-HVDC 作为一种能量可控的输电装置, 其特性必然对发电机组的次同步阻尼有一定影响[24]。

VSC-HVDC 接入系统后, 无论整流和逆变状态时都能提高相邻发电机组的阻尼[24] [44], 且换流器逆变运行时提供的阻尼要大于整流运行时提供的阻尼[44], 但是其只能提高一定水平的阻尼, 不能从根本上抑制次同步振荡。机组作用系数法是研究 HVDC 产生 SSO 的一种常用方法, 研究 VSC-HVDC 引发的 SSO 也可采用机组作用系数法(UIF)。文献[24] [44]仿真表明, 随着 UIF 的增大, 其所能提供的阻尼越大。

VSC-HVDC 基本控制方式一般分为四种[24]: 定有功和无功、定有功和交流电压、定直流电压和无功和定直流电压和交流电压。文献[24] [45]电气阻尼曲线表明, 在次同步频率较小(小于 20 Hz 左右)时换流站控制方式对阻尼特性有影响; 但是当次同步频率较大时分析结果有较大差异, 文献[24]得出, 当频率大于 20 Hz 时, 控制方式对阻尼特性影响不大, 而文献[45]曲线表明定直流电压和交流电压方式提高的阻尼显著大于其他方式。

为了增强 VSC-HVDC 对次同步振荡的抑制效果, 可以在控制系统配置有功 SSDC 或无功 SSDC, 其可以动态调节 VSC 从交流系统中吸收的有功或无功, 可有效避免发电机次同步振荡的发生[45]。文献[46]采用加装 SSDC 的 VSC-HVDC 系统, 结果表明对 SSO 有较好的抑制作用。但是这种方法只能对有功或无功进行调节, 且单独采用有功 SSDC 或无功 SSDC 来抑制次同步振荡, 需要的增益幅值较大, 不利于系统稳定运行[24]。文献[43]采用为 VSC-HVDC 配置混合附加阻尼控制器(H-SSDC), 同时配置有功和无功 SSDC 来抑制 SSO, 仿真结果表明, 与有功 SSDC 或无功 SSDC 相比, 该方法抑制次同步振荡效果更强。

## 6. 风电经 HVDC 并网对 SSO 的影响

随着我国风力发电的快速发展和负荷中心逆向分布的特点,远距离、高电压和大规模输送风能的格局已形成。大规模风电送出一般有串补或者 HVDC 两种方式。而这两种措施都有可能引起次同步振荡的风险,威胁电网正常运行。故对风电经 HVDC 并网次同步振荡的研究方兴未艾。

在风机次同步振荡研究中,一般将 HVDC 控制参数不合理可能引起次同步振荡,称为装置引起的次同步振荡(Sub-Synchronous Control Interaction, SSTI) [47]。相对于火电机组,风电机组更容易发生次同步振荡,这是因为双馈异步风电机组和永磁直驱风电机组轴系自然扭振频率相对较低(0~10 Hz),而直流输电对较低的扭振频率更容易引起电气负阻尼作用[47]。

文献[48]仿真得出,当基于定速感应发电机的风电场与直流换流站临近时,将会激发风电机组较低频率的扭转模态,但缺乏深入分析。文献[49]研究了基于双馈风机风电场经 LCC-HVDC 并网的次同步振荡特性,得出 1) 轴系模态对转子侧变流器 RSC 的功率外环控制器比例系数、电流内环控制器比例系数和电流内环控制器积分时间常数参数比较敏感;若控制器参数设计不当,次同步振荡模态的阻尼可能为负,导致系统不稳定。2) 对于轴系模态,随着风速的增大,模态阻尼先略微减小后逐渐增大,模态频率略微增大。3) 当 HVDC 的运行状态改变时,如果不能保持整流母线电压不变,轴系会受到影响;随着整流母线电压升高,整流器触发角增大,轴系模态阻尼减小,轴系模态的频率基本不变。文献[50]针对一个海上风电经 VSC-HVDC 并网,风电场和 HVDC 的控制措施会产生次同步振荡,并提出一个主动阻尼方案来抑制振荡。文献[51]针对大型双馈风电场通过基于模块化多电平换流器(MMC)的纯柔性直流输电系统并网时,提出一种基于附加次同步振荡电流抑制的送端换流站控制策略仿真结果表明风电场输出的次同步振荡电流得到明显抑制。综合来看,对风电经 HVDC 并网产生次同步振荡的机理仍不够清晰,对次同步振荡的抑制手段也有待实用化。

## 7. 研究展望

随着我国经济发展对自然资源的需求和全国联网的实施,未来我国直流输电工程也将得到进一步发展和实施。针对高压直流输电系统产生的次同步振荡问题,目前的研究还不是很完善,有以下几个方面还待深入研究:

1) 随着我国输电网络的发展,多端直流输电工程越来越普遍,而多条高压直流线路由于相互之间会产生作用,产生的次同步振荡问题比单一直流线路要复杂的多,而在这一方面的研究国内外很少,是未来 SSO 研究的方向之一。

2) 随着 VSC-HVDC 技术的发展,尤其近几年采用模块化多电平换流器(MMC)的 VSC-HVDC 技术逐渐普及,VSC-HVDC 在输电系统中扮演越来越重要的角色,目前在这一方面的研究较少,需要进一步研究 VSC-HVDC 对 SSO 的影响。

3) 风电在我国作为主要的新能源,得到迅速发展;但经 HVDC 并网的风电对风机和汽轮机组的 SSO 影响,国内外研究相对较少,值得学者进一步深入探索。

4) 目前,在 HVDC 的 SSO 分析中,次同步阻尼器通常采用线性化模型在一特定运行点附近进行控制;这适用于 SSO 小扰动分析中,但当扰动较大时控制往往不能满足要求。因此,如何将非线性控制理论运用到次同步阻尼器设计中,也是未来 SSO 的研究趋势之一。

## 参考文献 (References)

- [1] IEEE Std 1204-1997 (1997) IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capacities. IEEE Power & Energy Society, New York.



- [2] 赵遵廉. 中国电网的发展与展望[J]. 供电企业管理, 2003, 37(1): 1-6.
- [3] 苏靖棋. HVDC 引起的次同步振荡分析及抑制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [4] Bahrman, M., Larsen, E.V., Piwko, R.J. and Patel, H.S. (1980) Experience with HVDC-Turbine Generator Torsional Interaction at Square Butte. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **99**, 966-975. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAS.1980.319726>
- [5] 毛晓明, 张尧, 张艳. 高压直流建模研究的相关问题[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 14-17.
- [6] 孙慧平, 王西田, 李秀君. 高压直流输电动态相量模型的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 21-25.
- [7] 田芳. 含晶闸管元件的电力系统小干扰稳定性分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.
- [8] 戚庆茹, 焦连伟, 严正, 等. 高压直流输电动态相量建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 28-32.
- [9] Zhu, H.J., Cai, Z.X., Liu, H.M., *et al.* (2006) Hybrid-Model Transient Stability Simulation Using Dynamic Phasors Based HVDC System Model. *Electric Power System Research*, **76**, 582-591. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2005.09.017>
- [10] 黄胜利, 宋瑞华, 等. 应用动态相量模型分析高压直流输电引起的次同步振荡现象[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 1-4.
- [11] 杨秀, 陈陈. 高压直流输电的采样数据动态建模[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 30-34.
- [12] 杨秀, 陈陈. 基于采样数据模型的高压直流输电动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 7-11, 136.
- [13] Sun, H.P., Yang, X., *et al.* (2011) Improved Dynamic Phasor Model of HVDC System for Subsynchronous Oscillation Study. *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, 6-9 July 2011, 485-489.
- [14] 徐英新. 电力系统次同步振荡阻尼与晶闸管控制装置的模型研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [15] 周长春, 徐政. 由直流输电引起的次同步振荡的阻尼特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 6-10.
- [16] 程江平. 高压直流输电次同步振荡分析[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [17] 李周. 交直流混合输电网稳定运行的若干关键问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2013.
- [18] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [19] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [20] 余涛, 董家鹏. HVDC 整流站控制系统设计的频域理论分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 35-42.
- [21] 杨秀, 陈陈, 等. HVDC 控制系统对汽轮发电机组次同步振荡的影响[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 5-8.
- [22] 周长春, 徐政. 一种评价多个直流换流站系统次同步扭振相互作用的新指标[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 6-11.
- [23] 郑蕤. 带串联补偿的交直流并列系统次同步振荡特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [24] 肖湘宁. 电力系统次同步振荡及其抑制方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [25] 王敏华. 高压直流输电系统的次同步振荡分析与控制器设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [26] 曹镇. 基于 EMTDC&RTDS 的高压直流输电系统次同步振荡分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [27] 曹镇, 石岩, 等. 呼辽±500 kV 直流工程送端系统次同步振荡仿真分析[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 107-112.
- [28] 李伟, 肖湘宁, 等. 基于模态控制的附加阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 76-81.
- [29] 陈祥龙. 交直流混合电力系统次同步振荡抑制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [30] 余耀, 麻亚东. 用于鄂温克电厂送出系统的 SSDC 设计与分析[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(2): 72-78.
- [31] 冯煜尧, 洪潮, 等. 高压直流系统附加次同步阻尼控制器的综合设计[J]. 华东电力, 2008, 36(5): 53-56.
- [32] 伍凌云. 复杂交直流输电系统次同步振荡的分析与控制[D]: [博士学位论文]. 成都: 四川大学, 2007.
- [33] 张帆, 徐政. 直流输电次同步阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 13-17.
- [34] Hsu, Y.Y. and Wang, L. (1989) Modal Control of an HV DC System for the Damping of Subsynchronous Oscillations. *IEE Proceedings C—Generation, Transmission and Distribution*, **136**, 78-86. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-c.1989.0013>
- [35] 付伟, 李兴源, 等. 基于 PRONY 辨识的附加最优次同步阻尼控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(5): 10-15.

- [36] 江全元, 程时杰, 曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 87-91.
- [37] 杨秀, 王西田, 陈陈. 基于 $H_{\infty}$ 鲁棒控制理论的高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制设计[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 57-61.
- [38] 黄北军. 高压直流输电系统的次同步振荡分析与控制[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [39] 李宽, 李兴源, 等. 基于射影定理分层控制的次同步阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 80-84.
- [40] 齐阳. 多 HVDC 输电系统 SSO 抑制措施的协调控制研究[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 108-112.
- [41] 顾强, 武云生. 交直流送出系统次同步振荡及抑制措施的研究[J]. 电源学报, 2015, 13(5): 83-92.
- [42] 徐振宇, 李树鹏, 等. 基于遗传模拟退火算法的 SEDC 与 SSDC 控制参数的协调优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1983-1988.
- [43] 高本锋, 徐坤, 等. VSC-HVDC 抑制串补引发的次同步振荡研究[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 556-560.
- [44] 徐坤, 赵成勇, 高本锋. VSC-HVDC 的次同步阻尼特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 1-5.
- [45] 郑超, 汤勇, 等. 基于等效仿真模型的 VSC-HVDC 次同步振荡阻尼特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 33-39.
- [46] 蒋平, 等. VSC-HVDC 多通道附加阻尼控制抑制次同步振荡[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 27-31.
- [47] 高本锋, 张学伟, 等. 大规模风电送出系统的次同步振荡问题研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(7): 1-10.
- [48] Choo, Y.C., Agalgaonkar, A.P., Muttaqi, K.M., Perera, S. and Negnevitsky, M. (2010) Subsynchronous Torsional Interaction Behavior of Wind Turbine-Generator Unit Connected to an HVDC System. *IECON 2010—36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, 7-10 November 2010, 996-1002. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-c.1989.0013>
- [49] 杨琳. 新能源电力系统的次同步振荡与阻尼控制特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [50] Amin, M., Molinas, M. and Lyu, J. (2015) Oscillatory Phenomena between Wind Farms and HVDC Systems: The Impact of Control. *IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*, Vancouver, 12-15 July 2015, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1109/COMPEL.2015.7236513>
- [51] 吕敬, 董鹏, 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.

#### 再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>