

抑制区间振荡工程措施的评估和应用策略分析

王青, 马世英

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 电力系统区间振荡因涉及范围广、影响面积大, 已成为严重威胁互联电网安全稳定运行的突出问题。针对目前工程上已有多种抑制措施投入使用, 但在不同措施系统评估和综合比较方面存在研究不足的问题, 对改变电网结构、增加控制设备和调整运行方式三类基本措施的特点、效果和适用性进行了系统性的评估, 并从需要的设施、投资高低、应用条件、对网架和运行方式变化的适用性及对其他方面的影响等方面进行了综合比较分析, 在此基础上提出了综合应用策略和需要进一步研究的方向。

关键词: 电力系统; 区间振荡; 电网结构; 电力系统稳定器; 可控串补; 静止无功补偿器; 直流调制

Evaluation and strategy analysis of power system inter-area oscillation damping measures

WANG Qing, MA Shi-ying

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Inter-area oscillation has severe influences on the secure operation of interconnected power systems, due to numerous generators and areas involved. Nowadays, many damping measures have been applied to engineering, but comprehensive evaluation and intensive comparison of different measures are insufficient. Aiming at this problem, firstly this paper classifies the damping measures as three types, i.e. optimizing power grid structure, installing controllers, and adjusting operation mode. Then, the characteristic, effect, and adaptability of these measures are evaluated, and the differences are compared from various aspects, including facility, investment, application condition, adaptability to the change of power grid and operation mode, and other influences. Based on the conclusion of the evaluation and comparison, the systematic strategy of damping inter-area oscillation and prospective research directions are proposed.

Key words: power system; inter-area oscillation; power grid structure; PSS; TCSC; SVC; HVDC modulation

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0153-05

0 引言

电力系统低频振荡通常划分为局部振荡模式和区域振荡模式两种。局部振荡模式主要指单台发电机或单个电厂或一个小水电群相对主网系统其他部分的振荡, 振荡频率一般在 0.7~2.5 Hz 范围内。区域振荡模式指系统中一个区域的发电机群相对另一个区域的发电机群之间发生的振荡, 因参与机组多, 其振荡频率比局部振荡低, 一般在 0.1~0.7 Hz 之间, 同时由于涉及范围广, 区间振荡比局部振荡的危害要大, 尤其在当前电网互联规模不断扩大、电网运行方式日益复杂, 新技术新设备的应用带来不确定因素增多情况下, 区间振荡发生的风险和危害进一步增大, 加强对区间振荡抑制措施的研究具有十分重要的现实意义^[1-4]。目前已投入工程实际使用的

措施^[5-12]可大致概括为三种基本类型: 改变电网结构、增加控制设备和调整运行方式, 前两种措施下面又可进一步分为若干小类, 而以往的讨论多针对单一的措施, 对不同措施的特点、效果和适用性等问题缺乏系统性的评估和较为深入的综合比较。本文将对不同措施进行多层次多角度的评估和比较分析, 并提出综合应用策略和进一步研究的方向。

1 措施特点、效果和适用性评估

1.1 改变电网结构

坚强、合理的电网结构对于保证电力系统安全、稳定运行具有至关重要的作用, 区间振荡往往与链式电网结构相关, 即多个内部联系相对紧密的区域电网之间通过较弱的联络线串联在一起的结构, 从电网结构入手抑制区间振荡的措施又可分为两类:

- 1) 将一个同步电网通过直流隔离为两个同步电网;
- 2) 增强系统内不同区域电网间的紧密程度。

第一种措施利用直流对振荡的隔离作用,可根本改变振荡模式参与的机组构成,消除相关的区间振荡模式。这种方法还有减小两侧系统短路电流的作用,但是对系统也存在不利的影 响:两侧系统间在故障下交流互联时固有的功率支援作用消失;频率稳定性降低;直流比交流运行可靠性低,故障和停运风险大,此外因惯量的改变两侧系统暂态稳定性可能明显变化,需要跟踪计算分析。因此,采用该方法与否必须进行多角度的评估分析,权衡利弊。我国在2003年进行东北、华北、华中、川渝电网交流互联时,系统中存在一个振荡频率位于0.1~0.2 Hz之间,东北华北电网机组相对华中川渝电网机组的超低频区间振荡模式^[13],在一定条件下该模式阻尼减弱会对系统稳定运行构成很大的威胁,经充分研究后实施了将东北、华北电网间交流联网改造为通过直流背靠背联网的工程,消除了超低频振荡模式,规避了该模式可能引发大范围低频振荡的风险。目前一些电网存在与主网联系薄弱的小水电群大量功率送出的情况,其送电规模有可能受动态稳定问题制约,此时直流背靠背隔离的措施不失为一种选择,可在经济技术综合比较后采用。

第二种改变电网结构措施是加强电网互联的紧密程度,如果采用增加联网通道、扩大联网点的方法通常可取得较好的抑制区间振荡的效果,同时还能明显提高暂态稳定性和断面输电能力。西北电网陕甘断面原有4回330 kV联络线,因陕西电网对甘青宁电网区间振荡模式阻尼较弱限制了断面输送容量,通过增加750 kV双回兰州东-平凉-乾县线路构成的联网通道,可以使陕甘断面送电能力不再受动态稳定问题制约^[5]。需要强调,对于单点弱联系结构,即两个电网通过两个变电站弱联系的结构,通过增加并联联络线数目或者加装固定串补的方法抑制区域振荡未必有效。东北电网和华北电网曾通过500 kV高岭-姜家营交流联络线相联,系统存在华北相对东北约0.3 Hz的区间振荡模式,进行联络线单回运行和双回运行两种情况的计算,发现在一定方式条件下该模式的阻尼在单回联络线时反而强于双回联络线时的情况^[14]。福建电网与华东主网现通过500 kV双龙-宁德交流联络线相连,系统存在福建相对华东主网的区域振荡模式,在2007年方式基础上进行联络线加装固定串补和可控串补方案研究时,发现该模式的阻尼随固定串补度的增加并未增强而是稍有降低,串补度从0%增至40%,阻尼比由0.021降至0.017^[7]。

由于改变电网结构的措施需要增建线路、变电站等一次设备,因此投资大。

1.2 增加控制设备

在抑制区间振荡的工程实践中重要的一类措施是增加控制设备,主要包括:电力系统稳定器(PSS)、可控串补(TCSC)、静止无功补偿器(SVC)和在直流控制中附加直流调制,其中TCSC和SVC属于灵活交流输电技术(FACTS)中较为成熟的产品,其他类型的FACTS技术,如静止同步串联补偿器(SSSC)、储能装置(ESS)、统一潮流控制器(UPFC)等^[15],目前还基本停留在研究探索阶段,离工程实用的要求还有一定的差距。

(1) PSS

PSS是发电机自动励磁调压器的辅助控制环节,其基本功能是通过增加发电机的电磁阻尼转矩,抑制功率振荡,提高系统的动态稳定水平。目前工程上PSS仍采用固定参数的超前滞后相位补偿结构,参数整定上采用基于单机无穷大系统模型的现场试验方法,反馈输入信号为所装机组的局部信号,包括轴转速、机组频率和电功率等,这些信号对区间振荡模式的可观性较局部振荡模式的要低,因此就单台机组的PSS而言,对区间振荡的抑制效果可能较弱,但是如果在参与区间振荡的机组普遍安装PSS,并且参数整定的频率范围中考虑到区间振荡模式,根据以往工程实践经验,总体效果大致可以满足工程需要^[16]。正是由于PSS提高区间振荡模式阻尼的思路是依靠大批机组PSS的“累积效应”,因此少量机组PSS随机组跳闸或停运而失效通常不会对区间振荡抑制效果造成很大的削弱作用。此外,确定PSS超前滞后相位补偿参数的关键因素—励磁控制系统相频特性具有对电网运行方式和网架的变化不敏感的特点,这样就使PSS对运行方式和网架变化的适用性较好。

(2) TCSC

TCSC属于串联接入型设备,最基本的构成是晶闸管控制电抗器(TCR)和固定电容器(FC)相并联。通过控制晶闸管阀的导通时间,控制流过TCR的电流,改变TCR等效的基波电抗,进而改变整个装置的等效电抗。为抑制低频振荡TCSC需工作于容性调节模式,对外呈现容性电抗,通过对等效容抗平滑、连续、快速的调节,实现对所连线路感抗的动态补偿,抑制线路上的功率振荡。为了抑制区间振荡,要求TCSC应安装于大致振荡中心位置的区间联络线上,并且以对区间振荡可观性较好的信号作为反馈输入量,例如联络线有功功率,并且对控制参数进行精心设计。TCSC会随安装线

路的跳闸或停运而失效,并且当网架有较大变化时其效果不易保证。利用 TCSC 抑制区间振荡的一个工程实例是 1999 年巴西的南北联网工程,在北部和南部之间的单回额定电压 500 kV,全长约 1020 km 紧凑型线路两端分别安装了补偿度为 6% 的 TCSC,有效抑制了北部电网机组相对南部电网机组约 0.2 Hz 的区间振荡,使联络线输送容量达到 1 300 MW^[8]。

(3) SVC

SVC 属于并联接入型设备,根据结构不同有两种常用的类型,一种是晶闸管控制电抗器(TCR)型,由 TCR 和电容器并联构成,通过平滑调节 TCR 的电抗改变整个装置的等效电纳,广泛应用于输电系统;另一种是晶闸管控制投切电容器(TSC)型,它的电抗值不能平滑调节,只能实现有级调节,多用于配电系统或者代替 TCR 型中的固定电容。SVC 最基本的功能是调压,以安装处高压母线的电压幅值为反馈输入量,根据电压的变化快速改变其等效电纳,调整注入系统的无功,产生增强系统无功电压调整能力、提高系统安全稳定水平和改善电能质量的作用,这种调压功能的 SVC 对功率振荡通常也有一定的抑制作用,但为获得理想的抑制效果,应给 SVC 设计附加阻尼控制环节,引入反映系统功率振荡的信号叠加到 SVC 的电压输入端,来控制等效电纳的变化。为了抑制区间振荡,要求 SVC 应安装于大致振荡中心位置的变电站主变第三绕组母线上,并且以对区间振荡可观性较好的信号作为反馈输入量,并且对控制参数进行精心设计。SVC 会随安装主变的跳闸或停运而失效,当网架有较大变化时其效果不易保证。利用带有附加阻尼控制的 SVC 抑制区间振荡的一个工程研究案例是 SVC 在贵州电网应用的研究项目,研究结果表明如果在贵州功率外送通道 500 kV 变电站安装带附加阻尼控制的 SVC,可显著增强贵州机组相对云南机组约 0.6 Hz 的区间振荡模式的阻尼,从而较大幅度提高云南和贵州外送能力^[9]。

(4) 直流调制

直流调制是指在直流输电控制系统中加入直流调制模块,根据交流系统电气量的变化调整直流的输送功率,动态吸收或补偿交流系统中的功率过剩或缺额,抑制交流系统的功率振荡。交直流联合电力系统有两种结构,一种是交、直流并联系统,如我国南方电网;另一种是两个交流系统通过直流构成异步联网,如我国华中电网与西北电网通过灵宝背靠背联网、华中电网与南方电网通过江城直流联网。对于交直流并联系统,直流调制如果参数整定

良好对于交流系统的区间振荡可有较好效果,并且直流线路的容量相对于被联交流系统容量的比例越大,控制的效果越好。美国西部太平洋直流联络线通过采用直流调制有效抑制了并联交流联络线上 0.33 Hz 的区间振荡模式的功率振荡,使交流联网线的输送能力由 2 100 MW 增大到 2 500 MW^[10]。直流调制会随直流闭锁或停运而失效,当网架有较大变化时其效果不易保证。对于直流异步联网系统,受换流站位置的制约,直流调制很难对与换流站电气距离较远的机组间的低频振荡产生明显的抑制作用,并且在利用直流调制抑制某侧交流系统区间振荡的同时,应考虑对另一侧交流系统可能产生的不利影响,因为对另一侧系统而言,直流调制功率相当于一个扰动,避免出现直流调制作用下某侧系统稳定性提高而另一侧系统稳定性被严重削弱的情况。

1.3 调整运行方式

区间振荡模式的阻尼水平与电网运行方式有着密切的关系,采用调整运行方式的措施是指通过调度员下令调整敏感机组出力,改变重要输电断面的潮流和电压来提高区间振荡模式的阻尼,抑制区间振荡。要保证其效果需要准确掌握系统区间振荡模式随运行方式变化的规律和特性,确定敏感机组和调整方案。基于 WAMS 的低频振荡辅助决策支持系统可为采取该措施提供方便,一方面利用分布在系统重要电厂和变电站的相角测量装置(PMU)可获得电网同步、实时、动态的行为信息,对发生的低频振荡主导模式和参与机组的分群情况进行监测,另一方面通过灵敏度计算给出调整运行方式提高区间振荡模式阻尼的建议方案,供调度员参考使用,保证在紧急情况下能尽快平息振荡或者避免情况进一步恶化。该措施通常需要降低主要输送断面输送的功率,限制了方式安排的灵活性,在负荷高峰期有可能造成限电。

2 措施综合比较和应用策略

前面改变电网结构、增加控制设备和调整运行方式三种抑制区间振荡的基本措施的效果和适用性进行了评估,以此为基础,下面从需要的设施、投资高低、应用条件、对网架运行方式变化的适用性及对其他方面的影响等方面对这些措施进行综合比较分析,结果如表 1 所示,可得如下结论:

(1) 直流隔离和加强电网互联紧密程度两种改变电网结构的措施因需要增建线路、变电站等一次设备,因此投资比其他措施明显大,其中直流隔离因可彻底改变振荡模式构成,效果确切,但对系统

的影响是多种、多方面的，要全面评估通盘考虑；通过增加联网通道加强电网互联紧密程度的措施更

具有一般性，可全面提高系统的安全稳定水平和供电可靠性，应把加强电网建设作为长期的基本策略。

表 1 抑制区间振荡工程措施的比较

Tab.1 Comparison of inter-area oscillation damping measures

措施	需要设施	投资	应用条件	对网架和运行方式变化的适用性	其他影响
改变电网结构	直流隔离	高	被隔离的区域电网中的机组是目标区间振荡模式的主要参与者	因可彻底改变振荡模式构成，效果确切	两侧系统间在故障下交流互联时固有的功率支援作用消失；频率稳定性降低；直流比交流运行可靠性低，故障和停运风险大；两侧系统暂态稳定性可能明显改变
	加强电网互联紧密程度	高	应仔细研究增强联网的方案，对于单点弱联系结构，单纯增加并联联络线的方法未必有效	有较强的适用性和可靠性	还可明显提高暂态稳定性和断面输电能力
增加控制设备	PSS	很低	需要系统中机组普遍配置 PSS，并且参数整定的频率范围中考虑到区间振荡模式	少量机组 PSS 随机组跳闸或停运而失效通常不会对区间振荡抑制效果造成很大的削弱作用，对运行方式和网架变化适用性较好	对其他方面一般影响不大
	TCSC	偏高	安装于大致振荡中心位置，参数整定良好	随安装线路的跳闸或停运而失效，当网架有较大变化时其效果不易保证	设置短路故障初期进行最大容性电抗的补偿还可提高暂态稳定性
	SVC	偏低	安装于大致振荡中心位置，设计有附加阻尼控制环节，参数整定良好	随安装主变的跳闸或停运而失效，当网架有较大变化时其效果不易保证	还可提高电压稳定性
	直流调制	很低	交直流并联系统中的直流调制如果参数整定良好可有较好效果，对直流异步联网系统未必有效和恰当	随直流闭锁或停运而失效，当网架有较大变化时其效果不易保证	还可提高暂态稳定性
调整运行方式	基于 WAMS 的低频振荡辅助决策支持系统	低	由调度员下令调整敏感机组出力，要求准确把握系统区间振荡模式随运行方式变化的阻尼特性	可在任何必要时使用	通常要降低主要输送断面输送的功率，限制了方式安排的灵活性，在负荷高峰期有可能造成限电

(2) PSS 抑制区间振荡的性价比最高，需充分利用，同时为克服传统 PSS 受反馈输入信号为局部信息，对区间振荡模式可观性低影响其抑制效果的不足，应积极研发以对区间振荡可观性好的广域信息为反馈输入量的新型 PSS，进一步提高 PSS 抑制区间振荡的性能。

(3) 对于交直流并联系统，直流调制如果参数整定良好可有较好的抑制区间振荡的效果，应重视采用，特别要加强研究多回直流协调阻尼控制技术，提高复杂系统中可能存在的多个区间振荡模式的阻尼。对于直流异步联网系统，应认识到受换流站位

置的制约采用直流调制抑制某侧交流系统中的区间振荡未必有效和恰当。

(4) TCSC 和 SVC 是 FACTS 中较为成熟的产品，将它们用于抑制区间振荡通常的场景为电网在一定时期存在明显长距离弱联系的结构，虽配置了 PSS 但系统中区间振荡模式的阻尼仍较弱不满足运行要求。TCSC 直接串联于超高压输电线路，对设备通流能力、耐压水平要求高，投资比并联于主变第三绕组较低电压等级母线处的 SVC 明显高，在工程投资估算中 SVC 设备的费用大约为 180 元/kvar，TCSC 设备的费用大约为 320 元/kvar。为抑

制区间振荡要求安装于大致振荡中心位置,并且以对区间振荡可观性较好的信号作为反馈输入量,精心设计控制参数。TCSC和SVC会分别随安装线路、安装主变跳闸或停运而失效,应制定在这种情况下可能区间振荡模式阻尼减弱到不可接受程度的应对预案。

(5)现代大型互联电网具有元件众多、方式多样、特性复杂的特点,即使采取了一些措施,在一定时期一定条件下仍然存在发生区间振荡的风险,比如区域电网间通过高低压电磁环网构成送电通道的情况,高一级电压线路的跳闸,有时会严重削弱区间振荡模式的阻尼,引发该模式下的低频振荡。调整运行方式这一措施是应对此类情况不可缺少的重要保障,为保证所制定的运行方式调整方案合理、有效,需要加强基于WAMS的低频振荡辅助决策支持系统的研究和开发。

3 结论

从当前互联电网受到日益突出的区间振荡问题困扰的实际情况出发,本文对改变电网结构、增加控制设备和调整运行方式三类基本工程措施进行了系统性评估和综合比较分析,提出了综合应用策略和需要进一步研究的方向,可为现场采取适当措施抑制区间振荡提供技术支持和参考。

参考文献

- [1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] CIGRE Task force 38. 01. 07 on Power System Oscillations. Analysis and control of power system oscillations[R]. Paris: CIGRE, 1996.
- [3] ROGERS G. Power system oscillations[M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [4] IEEE PES Working Group on System Oscillations. Inter-area oscillations in power systems[R]. New York: IEEE Power Engineering Society, 1995.
- [5] 董明齐,刘文颖,袁娟,等.基于增加联络线的互联电网低频振荡抑制方法[J].电力系统自动化,2007,31(17):94-98.
DONG Ming-qi, LIU Wen-ying, YUAN Juan, et al. Low-frequency damping method of interconnected power grids by increasing tie-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 94-98.
- [6] DEMELLO F P, CONCORDIA C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. IEEE Transactions on PAS, 1969, 88(4): 316-329.
- [7] 赵学强.采用可控串补技术解决华东-福建联网低频振荡问题[J].中国电力,2007,40(8):5-10.
ZHAO Xue-qiang. Damping low frequency oscillation after the interconnection of East China and Fujian power grids by adopting TCSC technology[J]. Electric Power, 2007, 40(8): 5-10.
- [8] GAMA C. Brazilian North-South interconnection control-application and operating experience with a TCSC[C]. //IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton(Canada): 1999:1103-1108.
- [9] 王青,孙华东.静止无功补偿技术提高贵州电网安全稳定性与输电能力研究[R].北京:中国电力科学研究院,2009.
- [10] CRESAP R L, SCOTT D N, MITTELSTADT W A. Small-signal modulation of the pacific HVDC inter-tie[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(2): 536-541.
- [11] 荆勇,洪潮,杨晋柏,等.直流调制抑制南方电网区域功率振荡的研究[J].电网技术,2005,29(20):53-56.
JING Yong, HONG Chao, YANG Jin-bai, et al. Suppression of inter-area power oscillation in Southern China power grid by HVDC modulation[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 53-56.
- [12] CHUNG C Y, WANG Lei, HOWELL F, et al. Generation rescheduling methods to improve power transfer capability constrained by small-signal stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 524-530.
- [13] 王青,闵勇,张毅威.超低频区间振荡现象的机理分析[J].继电器,2006,34(12):63-68.
WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yi-wei. Mechanism analysis of ultra low frequency inter-area oscillation[J]. Relay, 2006, 34(12): 63-68.
- [14] 王青.互联电力系统低频振荡机理与特性研究[D].北京:清华大学,2007.
- [15] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems[M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [16] 朱方,赵红光,刘增煌,等.大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J].中国电机工程学报,2007,27(1):1-7.
ZHU Fang, ZHAO Hong-guang, LIU Zeng-huang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7.

收稿日期:2010-03-29; 修回日期:2010-04-29

作者简介:

王青(1974-),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析和控制;E-mail:wangqing@epri.sgcc.com.cn

马世英(1969-),男,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析和控制。