

德宝直流调制对四川电网阻尼特性的影响

徐梅梅, 李兴源, 王渝红, 郑希云, 贺洋

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 以四川电网 2010 年丰大运行方式德宝直流单极运行为背景, 重点研究直流功率调制对四川电网小干扰稳定性的影响。根据可观性指标选取断面功率作为直流附加控制器的输入信号, 能够有效反映区域间的低频振荡信息。通过比较分析典型故障下各种运行条件的系统特性以及主振模式的 Prony 辨识结果, 表明德宝直流系统的大、小方式直流调制可以显著提高系统的区域间阻尼。为了校验参数的鲁棒性, 在系统各种运行方式下进行大量的时域仿真, 结果表明它能够与电网中现有 PSS 协调作用达到共同抑制四川电网低频振荡的目的。

关键词: 直流功率调制; 小干扰稳定性; 区域间阻尼; 低频振荡

Impact on the damping characteristics of Sichuan power grid by Debao DC modulation

XU Mei-mei, LI Xing-yuan, WANG Yu-hong, ZHENG Xi-yun, HE Yang

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Taking Sichuan power grid in the summer peak load period of 2010 for background, while Debao HVDC system operating in monopolar mode, this paper focuses on the impact of DC power modulation on small signal stability in Sichuan power grid. First of all, according to the observability index, intertie power flow is selected as the controller input signal, which can effectively reflect the inter-area low frequency oscillation information. After comparative analysis of the system characteristics of various operating conditions under typical faults as well as the Prony identification results of the main vibration mode, it indicates that the large and small mode DC modulation of the Debao HVDC system can significantly improve the inter-area damping. Finally, a great deal of time domain simulation is accomplished in order to check the robustness of the parameters. Results show that DC power modulation is able to damp the low frequency oscillation of Sichuan power grid with the coordination of the existing PSS.

Key words: DC power modulation; small signal stability; inter-area damping; low frequency oscillation

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0141-06

0 引言

预计到 2010 年,四川境内的几个大型直流输电工程即将建成投运,其中四川电网与西北电网将通过德宝直流异步连接。根据全国能源平衡需要、西电东送总体规划研究成果,大区联网后特别是在丰水期大运行方式下四川电网将有大量电力经四川交流通道远距离送往华中,输电线路承载力接近其稳定极限运行,稳定问题比较突出。从网络结构上看,四川电网是典型的远距离、重负荷输电系统,加上各主要发电机组安装的快速励磁装置,极易引发低频振荡。

目前,电力系统稳定器 PSS 仍然是抑制低频振

荡最经济有效的措施。四川电网中绝大多数中、大型发电机组和部分小容量发电机组都安装了相应的 PSS,使得大区联网后四川电网未发生极弱阻尼或负阻尼的低频振荡现象。一般情况下, PSS 对于局部模式和区域模式均会产生良好的阻尼效果。但相关文献指出^[1-2],对于四川电网中的区域振荡模式, PSS 的抑制效果并不显著。究其原因,系统中的低频机电振荡模式只会发生于转动惯量很大的区域电网间,这时单靠少数机组 PSS 产生的有限功率相位调节难以对众多机组均参与的区域模式产生显著影响。而大容量、远距离、多区域互联电网的区域间低频振荡是困扰电网安全稳定运行的突出问题。自 1976 年太平洋联络线直流工程安装功率调制器阻尼并联交流联络线上的振荡以来,直流调制在联网技术和电力系统安全稳定中的调节作用备受关注。

针对大规模交直流混合输电系统,国内已有大量文献^[3-10]研究利用直流系统的快速调节特性来改善系统运行的稳定性:小信号直流功率调制能有效抑制小干扰下的功率振荡,提高系统动态稳定性;在大扰动情况下,利用直流系统短时过载能力快速调制其注入交流系统的直流功率可以弥补暂态过程中功率的不平衡量,从而提高暂态功角稳定性。相关研究表明^[11-14],直流附加控制能对互联交流电网间的区域振荡模式产生良好的抑制效果。近年来随着广域测量系统 PMU/WAMS 的兴起,出现了与传统控制不同的广域阻尼控制思路^[15-17],将 PMU/WAMS 采集表征电网运行状态的广域信息与 PSS、HVDC 直流调制等手段相结合形成的广域闭环控制,是学术界与工程界最为感兴趣的课题之一。

本文在四川电网 2010 年丰大运行方式下,以德宝直流工程为研究对象,分析其不同结构的直流附加控制器对系统稳定性的影响。根据实际系统的运行特性详细讨论了德宝直流功率调制输入信号的选取,并通过大量的仿真分析优化配置控制器的相关参数,从而有效抑制互联交流电网间的低频振荡。

1 直流调制原理及设计原则

直流调制是在已有的直流输电控制系统中加入附加的直流调制器,从两端交流系统中提取反映系统异常(如频率、功率、电压等变化)的信号,来调节直流输电线路传输的功率,使之快速吸收或补偿其所连交流系统的功率过剩或缺额,起到紧急支援和阻尼振荡的作用,从而提高交流系统的稳定性。

在实际应用中,直流功率调制是阻尼电力系统摇摆、增强系统稳定性的强有力方法。功率调制可分为小方式调制、大方式调制和双侧频率调制。本文基于 BPA 仿真平台,根据四川电网的特点主要研究以上三种功率调制方式对系统小干扰稳定性的影响,其控制器结构分别如图 1、图 2 和图 3 所示^[18]。图中变量: T_d 、 T_{d1} 和 T_{d2} 为微分环节时间常数; T_f 、 T_{f1} 和 T_{f2} 为滤波器时间常数; ε 为引导补偿因子; K 为直流调制增益; A 、 B 、 C 、 D 为陷波滤波器参数; $P_{D\text{MIN}}$ ($I_{D\text{MIN}}$) 和 $P_{D\text{MAX}}$ ($I_{D\text{MAX}}$) 分别为设定的直流功率(电流)调制量下限和上限; ω_1 和 ω_2 分别为整流侧和逆变侧换流母线的频率信号; P_{AC} 、 I_{AC} 分别为交流线路的功率信号和电流信号; P_{MOD} 、 I_{MOD} 为直流调制控制器的输出信号。

小方式调制的输出信号为直流电流调制信号,主要用来增加系统阻尼,抑制小干扰情况下的功率振荡,提高系统的动态稳定性,其调制幅度一般只有直流功率的 3%~10%。

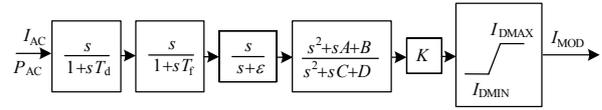


图 1 小方式直流调制原理框图

Fig.1 Principle diagram of the small mode DC modulation

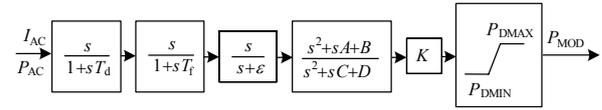


图 2 大方式直流调制原理框图

Fig.2 Principle diagram of the large mode DC modulation

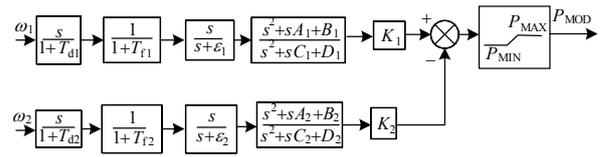


图 3 双侧频率直流调制原理框图

Fig.3 Principle diagram of the dual frequency DC modulation

大方式调制和双侧频率调制的输出信号均为直流功率调制信号,主要向系统提供同步功率,抑制故障后交流线路上的功率振荡,除了增强系统阻尼外,还可用于扩展系统暂态稳定极限,保障系统在大干扰下稳定运行,其调制幅度可达直流功率的 20%~50%。

直流功率调制的主要目标是抑制系统的区域间振荡模式,同时也能提高系统的暂态稳定性,其整定原则为:①能有效阻尼系统的区域间功率振荡模式;②对其他振荡模式没有损害;③具有良好的鲁棒性,对各种运行方式具有良好的适应性。

2 德宝直流附加控制器的分析与设计

为了抑制电力系统的低频振荡,最重要的是确定弱阻尼低频振荡模式以及这些振荡模式的表现形式和振源。根据有关单位进行的特征值分析结果可知^[1-2],四川电网中的弱阻尼振荡问题较为严重,与四川电网相关的区域间振荡模式主要有四川机组相对湖南、湖北、山东等机组,以及四川机组相对于陕西、山西、河北等机组的弱阻尼振荡。本文基于 BPA 仿真平台搭建了 2010 年四川电网丰大运行方式的仿真系统。在此基础上,根据实际系统的运行特性详细讨论了德宝直流附加控制器的设计,主要包括两部分内容:调制信号的选取和控制结构参数的整定。

2.1 调制信号的选取

针对德宝直流附加控制器的设计,从交流电网中选择合适的输入信号是有效发挥直流调制作用的

首要问题。双侧频率调制的输入信号一般固定取自换流站交流母线的频率差, 对于该输入信号本文不做详细讨论; 而大、小方式直流调制输入信号包括整流侧交流系统线路的电流或功率, 选择可观察性高的输入信号将有利于充分发挥直流附加控制的阻尼效果。根据工程经验可知: 针对其中一种调制方式选取的输入信号具有一定鲁棒性, 因此本节后续部分将以小方式调制为例来讨论直流调制信号的选取问题。

通过无直流调制时在直流功率指令处施加瞬时冲击小扰动, 基于线路有功功率的振荡幅值大小, 选取响应灵敏度较高的交流线路信号作为直流调制信号; 并在有直流调制情况下, 设置系统关键线路三永故障, 对于不同调制信号进行仿真计算, 验证初选结果的有效性。

2.1.1 直流参考功率冲击扰动(无直流调制)

为了不影响系统的稳定运行, 在无直流调制情况下给直流功率指令施加 10% 的瞬时功率冲击, 利用 BPA 稳定计算程序得到各交流线路有功功率的 Prony 辨识结果, 并按照功率振荡幅值从大到小进行排列, 如表 1 所示。

表 1 交流线路有功功率的 Prony 辨识结果

Tab.1 Prony identify results of the AC line active power

线路名称	振荡幅值	振荡频率/Hz
黄岩-万县	2.722 7	0.381 3
谭家湾-南充	1.735 1	0.383 6
谭家湾-绵阳	0.309 7	0.389 1
谭家湾-龙王	0.271 6	0.379 3
尖山-东坡	0.069 4	0.383 8

从直流功率冲击信号测试结果看出, 上述 500 kV 交流线路有功功率的振荡频率约为 0.38 Hz 左右, 属于区域间低频振荡模式的范围; 其中, 黄岩-万县交流线路的功率振幅最大, 谭家湾-南充次之, 说明二者对直流系统的运行特性较其他线路敏感, 其电流或者功率可观察性高, 可初步选为德宝直流调制的输入信号。

2.1.2 关键线路三相永久接地短路(有直流调制)

为了校核初选调制信号的有效性, 首先根据工程经验任意配置一组直流调制参数, 并在系统薄弱线路上设置三永故障, 选取不同的输入信号(以有功功率为例)进行时域仿真计算。通过对故障后系统稳定特性的比较分析, 确定一个最佳的调制信号。考虑到德宝直流送端的实际接线情况, 一方面以谭家湾变电站为中心, 主要考察与之相连的所有 500 kV 交流线路; 另一方面, 考察全网的薄弱环节以及与

德宝直流相邻的关键断面。综上所述, 将选择如下直流调制信号:

- 1) 取谭德换线功率(谭家湾-德阳换流站)
- 2) 取谭绵线功率(谭家湾-绵阳)
- 3) 取谭茂线功率(谭家湾-茂县)
- 4) 取谭南线功率(谭家湾-南充)
- 5) 取谭龙线功率(谭家湾-龙王)
- 6) 取谭德线功率(谭家湾-德阳)
- 7) 取尖东线功率(尖山-东坡)
- 8) 取黄万线功率(黄岩-万县)

根据四川电网的运行特点, 将设置以下典型交流线路三相短路故障: 0.2 s 时刻, 尖山-东坡双回 500 kV 线路其中一回在尖山侧出口处三相短路, 0.09 s 后跳开该回线路(简称为“尖山-东坡线路尖山侧三永故障”)。在有直流调制运行条件下, 通过监测故障后四川断面南通道线路有功功率的变化情况来考察上述输入信号对直流调制效果的影响, 相关的稳定曲线如图 4 所示。

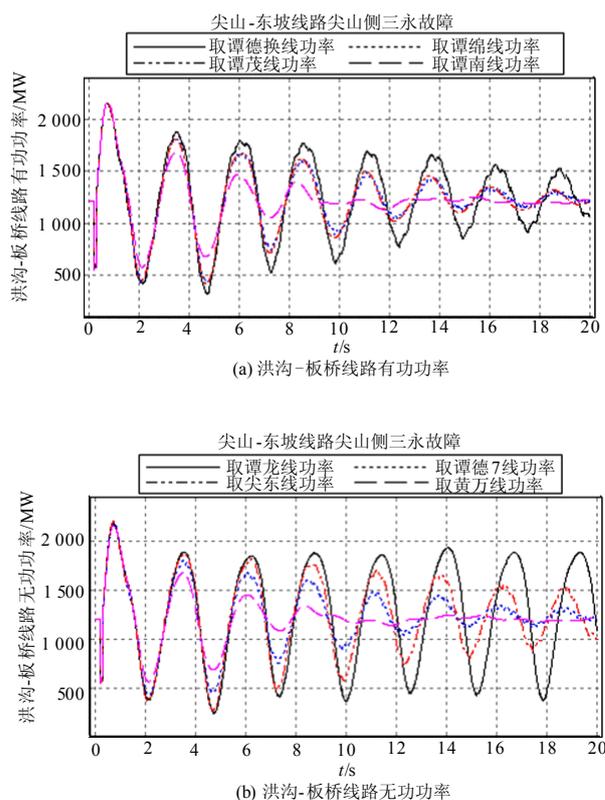


图 4 洪沟-板桥交流线路有功功率曲线

Fig.4 Active power curve of Honggou-Banqiao AC line

从仿真结果可以看出, 取谭家湾-龙王线路功率的调制效果最差, 而取谭家湾-南充线路功率和黄岩-万县线路功率作为输入信号时较其他线路功率的

调制效果显著,并且二者相差不大。这与基于 Prony 辨识的初选结果相一致,说明采用信号可观性的选择标准是正确的。根据地理接线情况,对于德宝直流来说由于谭家湾变电站离德阳换流站非常近,谭家湾变电站 500 kV 母线发生三相短路故障对德宝直流造成的影响最大,而黄岩-万县线路与德阳换流站的距离较远,直流系统运行特性受之影响比谭家湾-南充线路小;另外其为四川断面北通道,更能有效反映扰动后整个系统外送功率的振荡情况。因此可在黄岩-万县线路上安装广域测量装置系统,通过 PMU/WAMS 采集线路功率传送至德阳换流站作为直流调制的输入信号。综上所述,本文在仿真分析中将选取黄岩-万县 500 kV 交流线路有功功率作为大小两种方式直流调制的输入信号。但考虑到信号远距离传输的延时限制,建议在实际系统中选用谭家湾-南充线路的有功功率。

2.2 直流调制参数

直流调制是改善系统阻尼的有效办法,通过确定合适的时间常数和调制增益,可以获得期望的调制效果。由于大规模交直流系统结构复杂,具有很强的非线性,目前为止学术界还未提出一套较为成熟的且适用于工程实践的直流附加控制器的参数整定方法。本文选取的直流附加控制器参数主要来源于工程经验值^[3],然后采用动态仿真程序并根据 2010 年四川电网的丰大运行方式特性进行大量的优化整定分析,最终获取一组能够兼顾多方面运行要求且具有良好调制效果的德宝直流调制参数,分别如表 2~表 4 所示。

表 2 小方式直流调制参数

Tab.2 Parameters of the small mode DC modulation

调制信号	T_d	T_f	\mathcal{E}	$A-D$	K	I_{MIN}	I_{MAX}
黄万线有功功率	0.1	0.1	1.0	0	3.0	-0.1	0.1

表 3 大方式直流调制参数

Tab.3 Parameters of the large mode DC modulation

调制信号	T_d	T_f	\mathcal{E}	$A-D$	K	P_{MIN}	P_{MAX}
黄万线有功功率	0.1	0.1	1.0	0	3.0	750	2 250

表 4 双侧频率直流调制参数

Tab.4 Parameters of the dual frequency DC modulation

调制信号	T_d	T_f	\mathcal{E}	$A-D$	K	P_{MIN}	P_{MAX}
换流母线频率差	10	0.15	1.0	0	5e4	-750	750

3 德宝直流调制对系统阻尼的影响

本文将重点研究小方式、大方式、双侧频率三

类德宝直流调制策略对四川电网小干扰稳定性的影响。特别指出,根据此次研究的侧重点,通过德宝直流输电系统与四川电网异步连接的部分西北电网将采用简单系统模型。同样选取“尖山-东坡线路尖山侧三永故障”,基于 2010 年全国联网丰大方式数据进行时域仿真,下面将主要通过比较分析“无直流调制”、“小方式调制”、“大方式调制”和“双侧频率调制”四种运行条件下,故障切除后关键发电机组功角摇摆曲线以及四川断面的有功功率曲线特性来考察德宝直流附加控制器的阻尼作用,仿真结果分别如图 5 和图 6 所示。另外,表 5 还给出了各种运行条件下二滩机组功角曲线的 Prony 辨识结果。

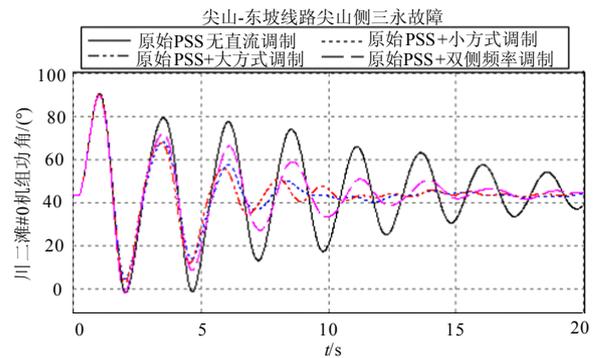


图 5 二滩机组的功角曲线

Fig.5 Ertan unit power angle curve

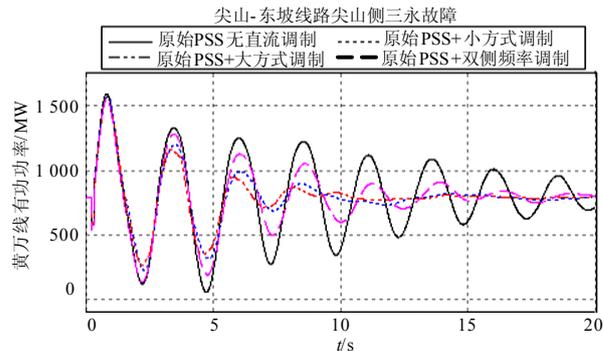


图 6 黄万线有功功率曲线

Fig.6 Active power curve of Huangwan AC line

表 5 二滩机组功角曲线 Prony 辨识结果

Tab.5 Prony identify results of Ertan unit power angle curve

运行方式	振荡频率/Hz	衰减系数	阻尼比
无调制	0.395 8	-0.101 0	0.040 6
小方式调制	0.392 2	-0.375 4	0.150 6
大方式调制	0.405 9	-0.506 4	0.190 8
双侧频率调制	0.383 5	-0.170 2	0.070 4

从各种直流调制方式下的功角曲线和有功功率曲线特性可以看出,“无直流调制”方案对应的曲线呈现减幅振荡的趋势,仿真时间直到 20 s 时都未达到稳定状态,说明系统存在弱阻尼低频振荡现象;加装直流附加控制后,不仅对曲线回摆有改善作用,而且振幅快速下降,振荡次数明显减少,系统功率振荡得到了有效抑制,最快在 10 s 左右就能基本趋于稳定;其中,大、小方式直流调制呈现出良好的阻尼效果,加快了系统振荡的衰减速度,二者调制作用相当,且优于双侧频率调制。

另外,从表 5 给出的 Prony 分析数据可知,四种运行条件下的系统主振模式与文献[1]中提到的四川电网 0.4 Hz 的区域间振荡频率基本对应,且无直流调制运行条件下的阻尼比仅为 0.040 6,属于弱阻尼低频振荡模式。而加装直流调制后,阻尼比增幅最大可达 0.15,大、小方式直流调制增加系统阻尼效果比较显著。德宝直流系统的三种附加控制器的调制参数都是在原有 PSS 配置的基础上进行优化整定的,通过上述分析表明它们均能不同程度地改善四川电网的阻尼特性。

4 其他运行方式下直流调制参数的校验

在四川电网 2010 年丰小方式、枯大方式及枯小方式等多种工况下进行大量的故障时域仿真计算,校验德宝直流附加控制器参数的鲁棒性。由于篇幅有限,在此就不再做详细分析。仿真结果表明德宝直流附加控制器无恶化系统稳定状况的现象,尤其是大、小方式直流调制仍然能够显著加强系统的小干扰稳定性。总之,就目前电网结构而言,德宝直流采用任何一种附加控制,只要设置合适的调制参数都能够提高系统区域间的弱阻尼,并且能够很好地与电网中现有 PSS 协调作用,共同抑制系统的低频振荡现象。

5 结论

(1) 根据选取响应灵敏度较高的交流线路信号作为直流调制信号的原则,通过对不同调制信号进行详细的仿真计算分析,本文选取黄万线有功功率作为大小两种方式直流调制的输入信号。但考虑到工程实践的需要,建议在实际系统中选用谭家湾-南充线路的有功功率。

(2) 对于小方式、大方式和双侧频率三种直流调制方案,分别通过比较分析典型故障方式下有无直流调制时系统运行特性,可以清楚地表明三种直流调制都具有改善系统阻尼的作用。针对四川电网 2010 年丰大运行方式,优化后的大、小方式直流调

制较双侧频率调制呈现出良好的阻尼效果。

(3) 从各种运行条件下系统主振模式的 Prony 辨识结果可以看出,四川电网的低频振荡问题是由于系统缺乏足够的阻尼引起的,可通过在德宝直流系统上安装直流附加控制器来提高区域间振荡模式对应的系统阻尼,从而抑制系统区域间低频振荡。

参考文献

- [1] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 78-83.
DENG Ji-xiang, HE Jian-ming, YAO Tian-liang, et al. Analysis of low frequency oscillation for Sichuan power grid in large scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2008, 32 (17): 78-83.
- [2] 姚天亮, 白洋, 欧小高, 等. 大区联网条件下四川电网低频振荡再分析[J]. 四川电力技术, 2008, 31 (4): 45-49.
YAO Tian-liang, BAI Yang, OU Xiao-gao, et al. The analysis of low-frequency oscillations of sichuan power grid in large regional interconnections[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2008, 31 (4): 45-49.
- [3] 李兴源, 刘红超, 陈凌云. 南方电网多馈入直流与交流并联系统的稳定与控制研究[R]. 成都: 四川大学, 2002.
- [4] 刘红超, 李兴源. 基于 PRONY 辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (7): 54-57.
LIU Hong-chao, LI Xing-yuan. Study of DC damping control in AC/DC transmission systems based on Prony method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (7): 54-57.
- [5] 金丽成, 刘海峰, 徐政. 多馈入直流输电系统小信号调制器的协调优化整定[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (13): 10-16.
JIN Li-cheng, LIU Hai-feng, XU Zheng. Coordination and optimization of small single modulators in multi-infeed HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (13): 10-16.
- [6] 杨卫东, 薛禹胜. 南方电网中直流输电系统对交流系统的紧急功率支援[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (17): 68-72.
YANG Wei-dong, XUE Yu-sheng. Emergency DC power support to AC power system in the south China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (17): 68-72.
- [7] 荆勇, 杨晋柏, 李柏青, 等. 直流调制改善交直流混

- 联系统暂态稳定性的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 1-4.
- JING Yong, YANG Jin-bai, LI Bai-qing, et al. Research on improving transient stability of AC/DC hybrid system by HVDC modulation[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 1-4.
- [8] 束洪春, 董俊, 孙士云, 等. 直流调制对南方电网交直流混联输电系统暂态稳定裕度的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 29-33.
- SHU Hong-chun, DONG Jun, SUN Shi-yun, et al. Study on advancing transient stability margin in AC/DC hybrid transmission system of southern China power grid by HVDC modulation[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 29-33.
- [9] 谢惠藩, 张尧, 夏成军, 等. 交直流互联电网直流功率调制相关问题[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 43-50.
- XIE Hui-fan, ZHANG Yao, XIA Cheng-jun, et al. Issues related to DC power modulation in AC/DC hybrid system[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 43-50.
- [10] 陈汉雄, 莫骏. 双侧频率调制改善特高压直流输电系统暂态稳定性研究[J]. 中国电力, 2009, 42(2): 34-38.
- CHEN Han-xiong, MO Jun. Study of DC bilateral frequency power modulation to improve UHVDC transient stability[J]. Electric Power, 2009, 42(2): 34-38.
- [11] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.
- LIU Hong-chao, LI Xing-yuan, WANG Lu, et al. Coordination and optimization of HVDC modulations in multi-infeed HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 5-9.
- [12] 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.
- [13] 沈梁, 陈陈, 史慧杰, 等. 直流调制对电网区间低频振荡的抑制作用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 82-86.
- SHEN Liang, CHEN Chen, SHI Hui-jie, et al. Suppression of inter-area low frequency oscillation by HVDC modulation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2008, 20(4): 82-86.
- [14] 许爱东, 金小明, 贺静波, 等. 特高压直流输电系统调制研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 55-58.
- XU Ai-dong, JIN Xiao-ming, HE Jing-bo, et al. Study on modulation design of UHVDC systems[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 55-58.
- [15] 朱浩骏, 兰洲, 蔡泽祥, 等. 交直流互联系统鲁棒自适应直流功率调制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 21-26.
- ZHU Hao-jun, LAN Zhou, CAI Ze-xiang, et al. Wide area measuring system signals based nonlinear robust adaptive DC power modulation controller in AC/DC interconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 21-26.
- [16] 吴小辰, 陆超, 贺静波, 等. 直流广域自适应阻尼控制器设计与 RTDS 实验[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 11-16.
- WU Xiao-chen, LU Chao, HE Jing-bo, et al. Design and RTDS experiment of adaptive HVDC supplementary damping controller based on WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 11-16.
- [17] 韩英铎, 吴小辰, 吴京涛. 电力系统广域稳定控制技术及其工程实验[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 1-8.
- HAN Ying-duo, WU Xiao-chen, WU Jing-tao. Research and experiment of wide-area stability control techniques in electric power systems[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1): 1-8.
- [18] 中国版 BPA 暂态稳定程序用户手册[S]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.

收稿日期: 2009-12-03; 修回日期: 2010-01-10

作者简介:

徐梅梅(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: xumeimei_1986@163.com

李兴源(1945-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、新能源发电及接入问题等;

王渝红(1971-), 女, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、新能源发电及接入问题等。