

# 高压直流输电次同步振荡时域仿真分析与控制

王敏华 康积涛 裴超志

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 电力系统输电过程中有一定概率产生次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO), 这种振荡极易造成汽轮发电机组的大轴损毁, 准确分析系统的次同步振荡特性对其防止和抑制有重要意义。高压直流输电由于其闭环控制的影响, 也会使系统产生次同步振荡现象。因此研究高压直流次同步振荡及其抑制措施问题具有重要的意义。以 CIGRE 高压直流输电模型为基础, 结合 IEEE 第一谐振模型, 搭建高压直流输电系统, 然后对其发电机电磁转矩、各轴段转矩进行分析。最后通过相位补偿原理设计 SSDC 进行抑制次同步振荡。

**关键词:** 次同步振荡; 高压直流输电; 次同步阻尼控制器

**Abstract:** There is a certain risk of subsynchronous oscillation (SSO) in power system transmission which is easy to damage the shaft of turbo generator, so it is of great significance to prevent and suppress subsynchronous oscillation by the accurate analysis of its characteristics. Because of its close loop control in high voltage direct current (HVDC) transmission, it will also make the system produce the subsynchronous oscillation. Therefore, it is of important significance to research the subsynchronous oscillation problem caused by HVDC and how to effectively control. Based on CIGRE HVDC model and combined with IEEE the first SSR model, the HVDC subsynchronous oscillation system is established, and then each shaft of electromagnetic torque and the torque in the generator are analyzed. Finally, the subsynchronous damping controller (SSDC) is designed with phase compensation principle in order to suppress subsynchronous resonance.

**Key words:** subsynchronous oscillation; HVDC; subsynchronous damping controller (SSDC)

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)04-0018-05

## 0 引言

中国的能源资源非常丰富, 但其分配极不均衡, 煤炭资源 80% 集中在西部和北部, 水资源 80% 集中在西南地区。但另一方面, 随着中国经济的快速发展, 用电负荷急剧增加, 尤其是中国的东部经济发达地区, 这一现状决定了必须采用大容量、超高压、远距离输电<sup>[1]</sup>。

高压直流输电具备损耗小、可以限制短路电流、线路造价低等优点, 因而在远距离、大容量输电方面具有不可替代的优势。越来越多的电力系统采用交、直流互联电网<sup>[2-3]</sup>, 由于大型受端电网的形成, 近年来的系统规划已开始出现多条直流和多条交流线路并列运行的多馈入交直流混合输电系统。

但是 HVDC 线路和汽轮发电机组之间的相互作用会引起发电机轴系与电气系统以一个或多个低于同步频率交换能量而损坏的现象, 从而引发次同

步振荡现象。次同步振荡是一类严重的系统稳定性问题, 不但会使系统产生振荡现象, 而且极易造成汽轮发电机组的大轴损毁<sup>[2]</sup>。如何采取有效措施抑制次同步振荡是电力系统中一项重要的研究内容。

文献[4]采用人工神经网络法对扭振系统的特征值进行实时分析, 可用于在线分析次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO); 文献[5]采用多变量频域法对次同步振荡进行分析, 可反映出发电机 dq 轴的不对称性; 文献[6]采用开环系统频率特性法对汽轮机调节系统的 SSO 特性进行分析; 文献[7]基于模态控制理论, 利用特征值法设计次同步振荡抑制器(subsynchronous damping controller, SSDC); 文献[8]提出了一种基于传递函数的波特图设计 SSDC 参数的方法; 文献[9]提出了与遗传算法相结合的 SSDC 设计; 文献[10]提出了基于  $H_{\infty}$  控制理论的 SSDC, 提高了 SSDC 的在线计算速度, 并使其具有一定的鲁棒性。

基于测试信号法, 先介绍高压直流次同步振荡

发生的原理,然后分析高压直流次同步振荡进行时域分析,最后根据高压直流次同步振荡抑制机理,设计 SSDC 抑制次同步振荡。最后利用 PSCAD/EMT-DC 软件在 IEEE 第一标准模型基础上,对其抑制效果进行了仿真验证。

### 1 高压直流次同步振荡机理

以图 1 所示的简化 HVDC 系统模型为例,分析 HVDC 引发 SSO 时系统状态量的变化过程, HVDC 整流侧在定电流或者定功率控制时引起的次同步振荡问题的状态量的变化过程见图 2。若与整流站紧密耦合的发电机上转子机械角速度施加一个微小扰动  $\Delta\theta$  ( $\Delta\omega$ ), 则将导致机端电压 (即图 2 中的换流站换流母线电压处  $U \angle \theta_U$ ) 的相位  $\theta_U$  和幅值  $U$  产生扰动, 经交流线路从而该扰动传递到整流站换流母线上。现代的 HVDC 系统中换流器普遍采用 EPC 方式, 对应于换流母线电压相位的扰动, 换流阀触发角  $\alpha$  将产生相同的扰动 ( $\Delta\alpha$ ), 因此换相电压幅值以及触发角的改变, 将会引起直流母线电压  $U_d$  的扰动, 而该扰动会引起直流电流  $I_d$  的变化, 并进一步导致直流功率发生变化 ( $\Delta P_d$ )。这两者的作用将导致直流电压和电流偏离平衡状态, 而 HVDC 定电流控制将感应这种偏差并加以快速校正和调整, 但是往往不能消除  $\Delta I_d$  ( $\Delta P_d$ ), 从而导致电流功率变化为  $\Delta I'_d$  ( $\Delta P'_d$ )。直流功率的变化  $\Delta P'_d$  通过交流网络的传递将导致交流功率变化  $\Delta T_e$ , 从而导致发电机电磁力矩变化  $\Delta T_e$ , 而  $\Delta T_e$  的变化又会最终又反馈作用于机组轴系。如果发电机转速的变化  $\Delta\omega$  与引起的电气转矩变化量相位滞后超过  $90^\circ$ , 则将形成一种正反馈性质的轴系扭振相互作用,  $\Delta T_e$  不断助增扰动幅值,  $\Delta T_e$  会进一步增大初始扰动  $\Delta\theta$  ( $\Delta\omega$ ), 就会出现电气负阻尼。一旦该电气负阻尼超过发电机组轴系所提供的正的机械阻尼, 就出现 HVDC 控制系统引起的轴系扭振不稳定<sup>[55]</sup>。

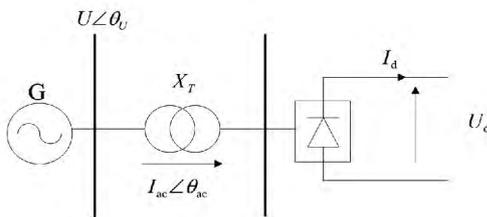


图 1 准稳态模型所依据的换流器电路结构

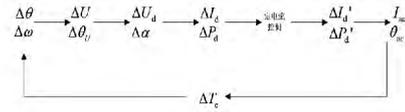


图 2 HVDC 引发次同步振荡系统状态量变化过程

### 2 高压直流次同步振荡抑制机理

SSDC 作为抑制 SSO 的有效而经济的手段, 其控制性能受反馈信号的选取和控制方法确定的影响, 同时还应考虑其与其他设备控制特性的协调。在第二章中关于 SSO 产生机理的更全面解释中提到, 负阻尼的实质是电磁转矩偏差对转子初始扰动产生助增作用, 也就是说电磁转矩偏差与发电机轴系转速偏差之间的相位大于  $90^\circ$ , 因此可以采用与 PSS 抑制低频振荡的原理相似的相位校正 (phase correction, PC) 来阻尼 SSO。也就是以发电机转速偏差或者频率偏差信号为反馈信号, 经过放大和相位校正处理, 其输出信号通过换流站控制回路提供一个附加的电磁转矩, 使其与原有电磁转矩偏差的合成量与转速偏差之间的相位小于  $90^\circ$  (如图 3 所示), 使整个系统呈现出正的电气阻尼。

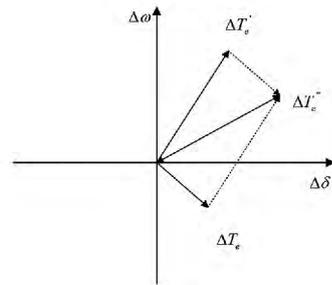


图 3 电气转矩的向量关系图

### 3 HVDC 次同步振荡分析

#### 3.1 HVDC 次同步振荡模型

如图 4 所示为含 HVDC 电力系统的典型简化模型, 该模型包含存在次同步振荡现象的待研机组 (图中虚框所示), 交流网络部分用无穷大电源 S1 和等值阻抗的串联组合与整流侧连接, 无穷大电源 S2 为逆变侧的受端系统。

该系统模型发电机及轴系模型的参数均采用 IEEE 第一谐振模型的参数, 直流部分采用 CIGER HVDC 标准模型, S1 和 S2 的额定频率均为 60 Hz, 端电压为 26 kV, 发电机的额定容量为 892.4 MVA,

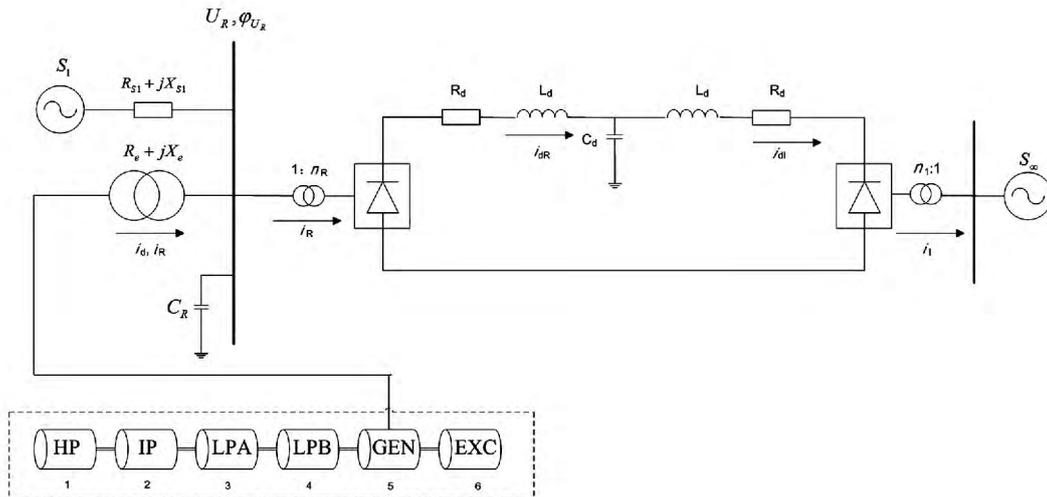


图 4 含 HVDC 次同步振荡的典型简化模型

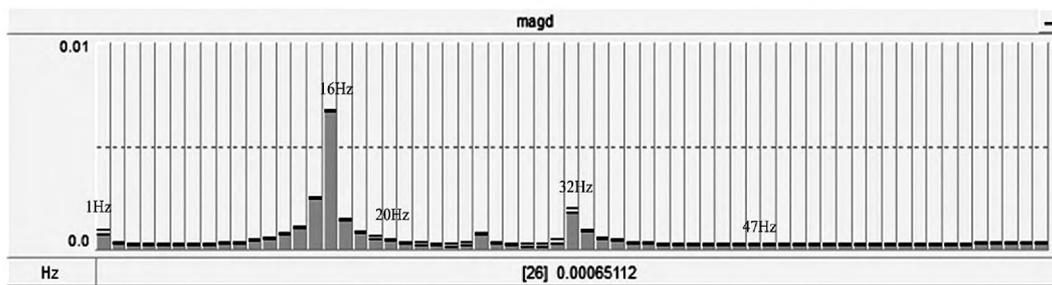


图 5 发电机转速 FFT 分析

直流额定输送功率为 1 000 MW ,额定电压为 500 kV。危害相当严重。

### 3.2 系统时域仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 中建立图 4 的仿真模型 ,发电机轴系采用 6 轴段模型 ,机械阻尼设为零。待系统进入稳态后 ,在发电机出线上于 2.5 s 时给出三相接地故障 ,故障持续 0.05 s 后切除 ,仿真时间为 20 s ,发电机各个轴系质块扭矩将发生次同步振荡。

对发电机转速偏差进行 FFT 分析得到其各频率分量的幅值情况 ,如图 5 所示 ,可以看出幅值较高的频率均对应于发电机轴系的轴系振荡模式。其中幅值最高的为 16 Hz ,其次为 32 Hz、25 Hz 和 20 Hz 分量的幅值大小相近 ,而 1 Hz 和 47 Hz 分量的幅值非常小 ,可以忽略。

对发电机各质量块相对于发电机的机械位置和相对于额定转速度 ,各质量块角速度偏差进行仿真分析 ,如图 6 和 7 所示 ,各质量块相对于发电机的机械位置明显处于振荡状态 ,而且呈增大的趋势。相对于额定转速度 ,各质量块角速度偏差发散的趋势非常明显 ,这些都表明了次同步振荡对发电机组

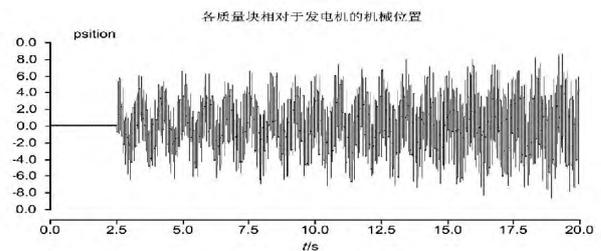


图 6 各质量块相对于发电机的机械位置

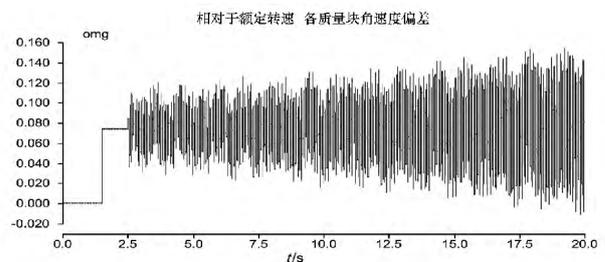


图 7 相对于额定转速度 ,各质量块角速度偏差

对发电机各轴段的扭矩、发电机转速度、电磁转矩进行仿真分析。如图 8 至图 10 得 ,在 2.5 s 施加扰动后 ,发电机各轴段的扭矩呈现发散现象 ,发电机转速与发电机电磁转矩呈现不稳定状态 ,系统发生次同步振荡。

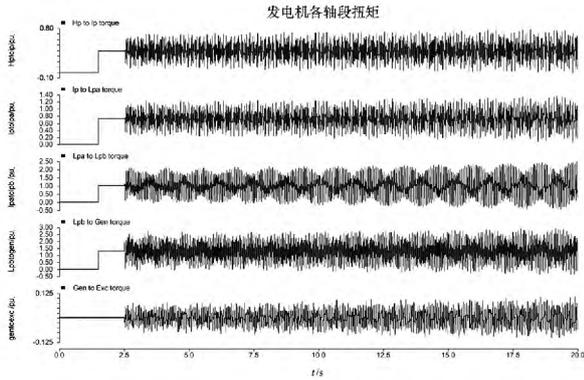


图 8 发电机发生故障时各轴段间的扭矩

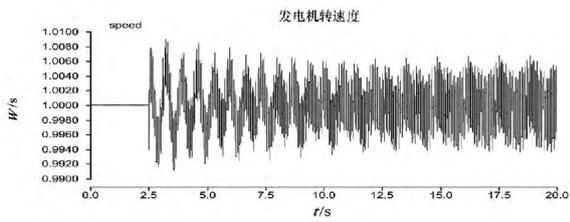


图 9 发电机转速运行示意图

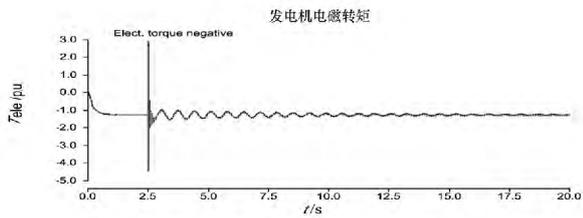


图 10 发电机电磁转矩示意图

## 4 HVDC 次同步振荡控制器设计

### 4.1 控制器 SSDC 设计原理

SSDC 抑制 SSO 时需要向发电机组提供一个足够大的正阻尼力矩才能抑制发电机发散的转速振荡。因此 SSDC 的控制策略为: 当发电机转速减小时, 在 SSDC 的作用下 HVDC 的直流电流参考值减小, 由于换流器的快速响应特性, 直流功率减小, 则发电机输出的电磁功率也将减小。对恒定的输入机械功率, 电磁功率的增加将导致转子动能的增加, 从而使得转子转速增加; 反之, 发电机转速减小时 HVDC 定电流参考值增加, 则直流功率增加, 发电机的电磁功率增加, 从而使发电机转子减速。在 HVDC 换流器的快速响应特性下, 通过 SSDC 的这种控制策略能增强发电机组的次同步振荡阻尼, 达到抑制系统次同步振荡的目的。

### 4.2 控制器 SSDC 设计方案

以图 4 建立的模型为研究对象, 其中转子轴系 6 个轴段构成 6 个轴段对应转子轴系 6 个扭振模

式, 除去一个刚体模式, 进行 SSO 分析的有 5 个扭振模式, 轴系的机械扭振模态频率分别为 15.71 Hz、20.21 Hz、25.55 Hz、32.28 Hz、47.45 Hz。由于在 47.45 Hz 处, 该模态近似为等幅振荡模式, 由于该分量所占比重非常小, 所以在设计阻尼控制器时只用考虑前 4 个扭振模式。

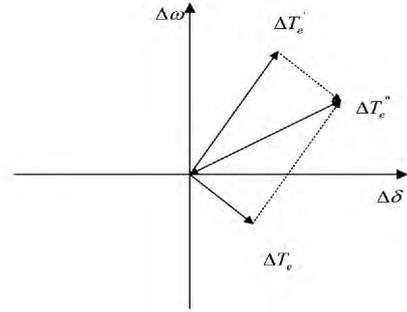


图 11 电气转矩的向量关系图

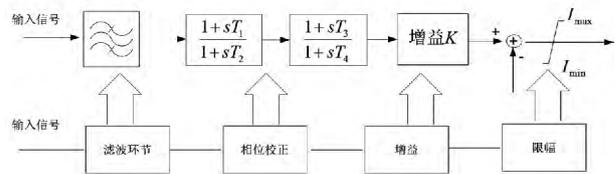


图 12 SSDC 结构示意图

SSDC 采用以发电机的转速偏差作为反馈信号, 采用分模态控制的方法, 经过 4 阶 Butterworth 滤波器, 通过相位补偿环节补偿负阻尼所需要的相位差, 最后经幅值增益和限幅环节得到电流补偿量, 将输出信号叠加至直流电流的整定值信号中, 共同作为定电流控制器的输入信号, 消除已产生的次同步振荡。

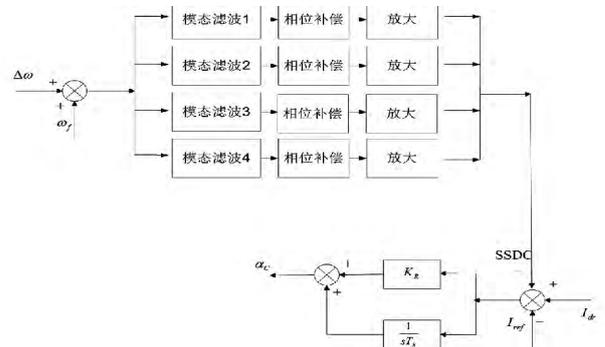


图 13 发电机转速偏差为反馈信号的多模态阻尼控制器

SSDC2 各个模式的滤波及相补环节如表 1。

表 1 SSDC 参数

模式	通带 /Hz	补偿频率点 /Hz	$\varphi_m /(^{\circ})$	环节个数	放大倍数
1	14 ~ 17	15.71	37	2	10
2	19 ~ 22	20.21	47.5	2	10
3	24 ~ 27	25.55	41.5	2	10
4	31 ~ 34	32.25	50	2	10

### 4.3 控制器 SSDC 抑制效果仿真分析

为进一步验证加入 SSDC 后,抑制次同步振荡的有效性,对图 4 所示模型加入 SSDC 进行仿真分析。待系统进入稳态后,在发电机出线上于 2.5 s 时给出三相接地故障,故障持续 0.05 s 后切除,仿真时间为 20 s。

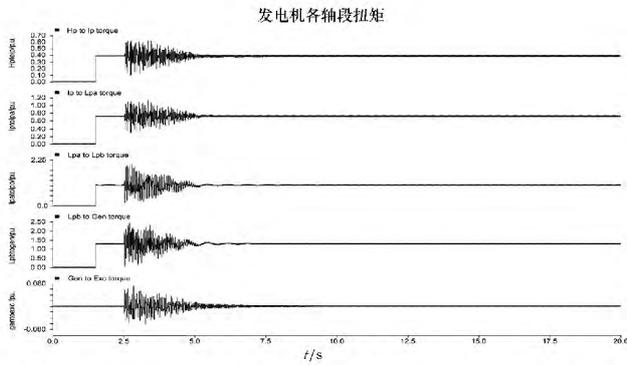


图 14 加入 SSDC 时发电机发生故障时各轴段间的扭矩

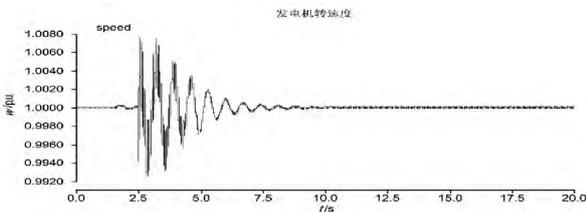


图 15 加入 SSDC2 时发电机转速示意图

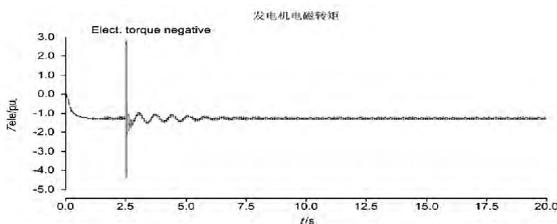


图 16 加入 SSDC 时发电机电磁转矩示意图

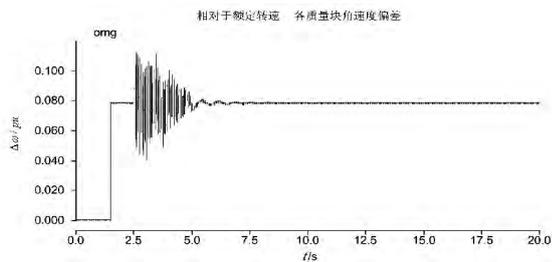


图 17 加入 SSDC 相对于额定转速,各质量块角速度偏差示意图

由图 14 ~ 图 18 可得,发电机各轴段扭矩、电磁转矩及发电机转速度等振荡都得到明显的收敛,次同步振荡得到了抑制。

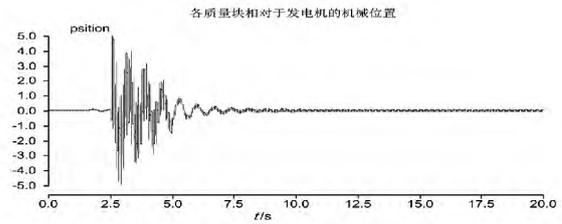


图 18 各质量块相对于发电机的机械位置示意图

## 5 结论

通过上述时域仿真分析,得出下列结论。

- (1) HVDC 系统的不正当控制将会引发次同步振荡现象,这将会引发系统发生故障乃至造成发电机损坏。
- (2) 通过对发电机转速度进行 FFT 分析可得,系统发生次同步的最大振荡频率为 15.6 Hz。
- (3) 设计的次同步阻尼控制器都可以达到抑制 SSO 的目的,也就是说在轴系扭振模态频率处电气阻尼转矩系数为正就可以抑制次同步振荡。

### 参考文献

- [1] 张运洲,张卫东. 国家电网公司电网“十一五”发展规划综述 [N]. 国家电网报, 2006-36-38(1).
- [2] 赵遵廉. 中国电网的发展与展望 [J]. 中国电力, 2004, 37(1): 1-6.
- [3] 于立宏. 能源资源替代战略研究 [M]. 北京: 中国时代经济出版社, 2008: 14-16.
- [4] Hsu YY, Jeng I H. Analysis of Torsional Oscillations Using Artificial Neural Network [J]. IEEE Trans. on EC. 1992, 7(4): 684-690.
- [5] 陈陈. 多变量频域法分析电力系统次同步振荡 [J]. 电力系统自动化, 1989(5): 22-27.
- [6] 于达仁,徐基豫. 大型汽轮机调节系统的设计对轴系扭振的影响 [J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(4): 35-39.
- [7] YY. Hsu and L. Wang. Modal Control of an HVDC System for the Damping of Subsynchronous Oscillations [J]. IEE proceedings, 1989, 136(2): 78-86.
- [8] R. J. Piwko, E. VLarsen. HVDC System Control for Damping of Subsynchronous Oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(7): 2203-2211.

(下转第 39 页)

热电采暖后地区电网的发电容量裕度和电网中可中断负荷都有所增加 如图 1 所示。

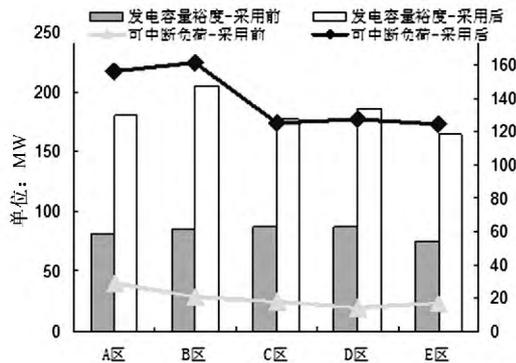


图 1 采用电采暖前、后发电裕度及可中断负荷对比

经过对该地区风电的时空特性分析,该地区风电反调峰率 0.63,风电同时率 0.77,那么采用蓄热式电采暖后系统调峰容量和接纳风电的能力如图 2 所示。

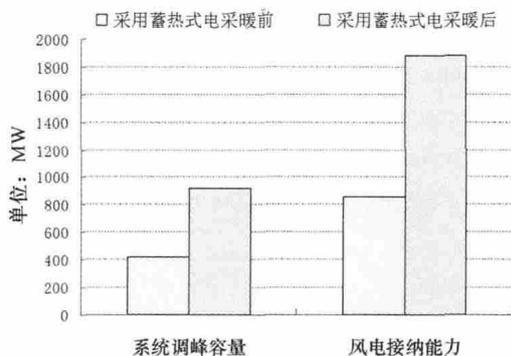


图 2 采用电采暖前、后风电接纳能力对比

通过图 2 可以看出,采用蓄热式电采暖后,由于发电机组的容量裕度和电网中可中断负荷均有所增加,系统的调峰容量由 415 MW 提高至 913 MW,电网风电接纳能力由 855.49 MW 提高至 1882.09 MW,利用蓄热式电采暖可有效提高电网接纳风电的能力。

## 6 结 论

随着越来越多城市雾霾现象出现,环境综合治理和清洁能源的开发应用已经成为备受关注的焦点问题,如何抑制风电波动性对电网稳定的影响,提高电网的风电接纳能力自然成为了研究的热点问题。前面根据冬季不同区域供暖期间的负荷特点,结合电采暖的特点和风电的运行特性,提出了对电网的电采暖负荷承载能力以及风电出力的时空特性的分析方法,并对蓄热式电采暖对电网接纳风电能力的影响进行了研究。结果表明,利用蓄热式电采暖能够有效提高电网的风电接纳能力,解决供热期间供热机组上网矛盾的同时,平衡风电出力的波动,提高电网运行的安全性。

### 参考文献

- [1] 谈小灵. 浅谈电采暖技术的优越性[J]. 煤炭工程, 2006(8): 64-65.
- [2] 肖明东, 余莉, 滕力. 电锅炉蓄热技术在某供暖工程中的应用[J]. 暖通空调, 2004, 34(1): 65-66.
- [3] 王振铭. 对电采暖应进行全面的科学论证[J]. 节能与环保, 2001(2): 7-10.
- [4] 吴功高, 叶中雄, 姚明, 等. 安徽电网接纳风电能力的分析研究[J]. 华东电力, 2011, 39(6): 97-99.
- [5] MILLIGAN M. Wind Power Plants and System Operation in the Hourly Time Domain [C]. AWEA Wind Power 2003 Conference, Austin Texas, May 18-21.
- [6] 吴醇. 风电场对电力系统调频和备用容量的影响[J]. 华东电力, 2011, 39(6): 93-96.
- [7] 颜巧燕, 温步瀛, 江岳文. 风电并网后系统备用容量需求分析[J]. 电力与电工, 2009, 29(2): 14-16.

作者简介:

张新伟(1986), 硕士, 主要从事电网稳定分析和调度控制的工作;

耿万梅(1986), 本科, 主要从事电网安全管理和新能源并网方面的工作。

(收稿日期: 2014-04-04)

(上接第 22 页)

- [9] 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, 2005(1): 87-91.
- [10] 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.

作者简介:

王敏华(1988), 硕士, 研究方向为电力系统的稳定与控制。

(收稿日期: 2014-04-02)