

风-火互补发电系统区域频率控制的策略研究

姚亮¹, 陈峦^{1,2}, 郑彬³, 周瑜¹

(1. 电子科技大学能源科学与工程学院, 四川 成都 611731; 2. 电子科技大学电力系统广域测量与控制四川省重点实验室, 四川 成都 611731; 3. 国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 风能与传统能源互补发电给互联电网各方带来了巨大的安全经济效益, 对互联电网频率控制的分析与研究是电力系统不可忽视的部分。讨论了发电系统的一次调频和二次调频, 分析加入风力发电后, 风-火互补发电的区域频率控制, 给出模型方案(增加PI调节环节进行改进), 对其中的三种控制模式(TBC-FTC、TBC-FFC、TBC-TBC)进行研究。仿真图及仿真结果数据验证了风-火互补发电的区域频率控制的可行性。与传统的单区域频率调节相比, 加入了风电的多区域频率控制能改善频率调节的性能。

关键词: 风能; 互联电网; 频率控制; 控制模式; 仿真

Research on area frequency control strategy of wind-fire hybrid power generation system

YAO Liang¹, CHEN Luan^{1,2}, ZHENG Bin³, ZHOU Yu¹

(1. School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. The Power System Wide-area Measurement and Control Sichuan Provincial Key Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 3. Electric Power Company of Sichuan Province Tianfu Power Supply Company, SGCC, Chengdu 610041, China)

Abstract: Wind and traditional energy hybrid power generation will bring to great safety economic benefit for interconnected power grid, the analysis and study of interconnected power grid frequency control not be ignored in power system. This paper discusses primary and secondary frequency control of power generation systems, analyzes wind and fire hybrid area frequency control after joining wind power, gives model scheme (increased PI regulation units), and studies three control modes (TBC-FTC, TBC-FFC, TBC-TBC). Simulation diagrams and simulation results verify the feasibility of the wind-fire hybrid power generation area frequency control. Compared with the traditional single area frequency regulation, joining area frequency control of wind power improves the performance of frequency control.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61304177).

Key words: wind energy; interconnected power grid; frequency control; control mode; simulation

0 引言

随着中国经济的高速发展, 环境问题成为当下最为关心的话题, 减少环境污染最为有效的方法之一就是发展新能源。风能以其无污染、可再生等优点受到高度重视, 成为我国能源结构中新的增长点。文献[1]主要介绍了风力发电现状与发展趋势, 根据国家能源局规划指出, 在资源丰富地区规划建设大型风电基地, 在其他地区加快风能分散开发, 到2020年, 风电发电装机将达到200GW。在我国, 风能集中分布在东北、新疆、内蒙古等偏远地区,

结合我国电力的地域分布^[2], 需要进行电网互联, 在这过程中, 电网频率的稳定成为电力系统供电质量的关键。

在中国的能源结构中, 火电和水电所占比重较大, 以往都是传统能源互联。根据我国的“十二五”规划, 中国将大力建设风电场, 风电所占比重逐年升高。那么将出现多能互补的局面, 比如风-火互补发电、光-水互补发电、风-光互补发电等。多能互补发电是中国新能源发展的趋势, 其中的区域频率控制是保证其电能可靠、电网安全不可或缺的因素。文献[3]研究了火电机组在孤网运行下的频率控制, 而文献[4]只研究了变速恒频双馈风力发电系统的

调频, 它们都只是各自的发电机组对各自区域进行单独的频率调节。本文在其基础上提出了将风电作为辅助调节功能, 对火电区进行功率支援, 进行电网区域频率的控制调节, 是一种新型的频率控制策略。该控制策略具有很好的应用前景, 能改善互联电网中单区域频率调节的性能。

1 电力系统的频率控制

1.1 电网的频率控制

电力系统运行时必须将电网频率控制在 50 Hz 附近的一个允许范围内。为了维持频率在目标值, 需要对产生和消耗的有功功率进行控制, 以确保发电和负荷的平衡^[5]。而负荷的用电功率是经常变化的, 需要通过发电机组的调速系统和电网的自动发电控制(Automatic Generating Control, AGC)来调节供电功率^[6]。

电力系统的频率控制通常使用分级控制来维持发电和负荷的平衡。一级频率控制, 又称一次调频, 是负荷、发电机对电网频率变化做出的自动响应, 其中主要是发电机组调速器的控制调节; 二级频率控制, 又称二次调频, 主要由电力调度中心的控制软件对发电机出力进行控制, 从而快速恢复频率偏移。图 1 是发电机组的一次调频模型, 其主要由调速器模型、原动机模型、发电机-负荷模型组成^[7], 该模型通过改变整定值改变机组出力, 可以实现有差调节。

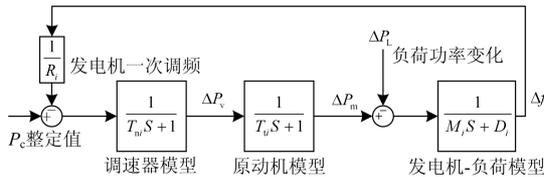


图 1 发电机组的一次调频模型

Fig. 1 Primary frequency regulation model of generation units

1.2 电网频率控制的参数

当电网频率与电网功率变化时, 它们会存在动态关系, 当电网功率出现差值 ΔP 时, 电网频率偏差 Δf 会与之存在如下传递函数的关系

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta P(s)} = \frac{1}{M_i s + D_i} \quad (1)$$

式中: M_i 为发电机组的惯性时间系数, 一般 $M_i = 5 \sim 10$ s; D_i 为负荷的频率调节效应系数(又称系统负荷阻尼常数)

$$D_i = \frac{\Delta P_{Df}}{\Delta f} \text{ (MW/Hz)} \quad (2)$$

当 D_i 换成标么值时, 表示频率变化 1% 所引起的负荷有功功率变化的百分率, 以 $D_i = 1$ 为例, 即: 当频率 +0.01(+0.5 Hz) 时, 负荷值会随之 +0.01(负荷 1%), 一般 $D_i = 1 \sim 3$ 。

在发电机组的一次调频中, 发电机组输出功率和频率静态关系的曲线成为发电机组的功频静态特性。发电机组的功频静特性曲线的斜率为

$$K_g = -\frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (3)$$

K_g 的标么值表示为

$$K_{g^*} = -\frac{\Delta P / P_0}{\Delta f / f_0} = -\frac{\Delta P_g}{\Delta f_g} = \frac{1}{R_i} \quad (4)$$

式中, R_i 称为发电机组的调差系数, 如 $R_i = 5\%$ 表示 5% 频率偏差引起功率输出 100% 的变化。一般情况下, 汽轮机组的调差系数的整定范围为 5%~7%, 双馈感应电机的调差系数的整定范围为 4%~7%。

调速器是发电机组的一个重要组成部分, 它的主要功能是维持机组间的负荷分配和机组的转速。汽轮机调速器的数学函数为 $1/T_m S + 1$, 其中 T_m 是调速器时间系数, 一般为 0.05~0.25 s。

汽轮机是把蒸汽储存的能量转换为机械能量, 再由发电机将其转换为电能。无再热汽轮机在数学上可以用一个一阶惯性环节来表示 $1/T_g S + 1$, 其中 T_g 是原动机的时间系数, 一般为 0.2~2 s。再热汽轮机的传递函数为 $\frac{SCT_{Ri} + 1}{(ST_{Ri} + 1)(ST_{Ug} + 1)}$, 它需要考虑再

热系统里蒸汽流的时间延迟, 其中 C 是蒸汽进入再热器前, 所产生功率占总功率的比例, 一般为 25%~30%, T_{Ri} 是再热器的时间系数, 一般为 5~10 s。

一般情况下, 负荷增减的值调度人员并不清楚, 不能实现频率的无差调节。当在该模型前端加入二次调频环节, 也就是在一次调频系统中加入了二次调频的积分环节, 将人员手动调节变为自动跟踪调节, 控制的目标是使频率偏差为零^[8]。加入二次调频环节后的系统模型如图 2 所示。

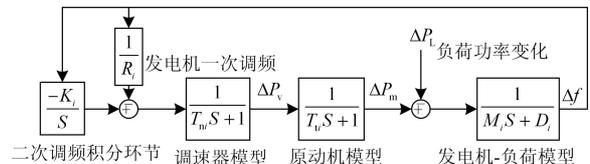


图 2 加入二次调频环节的模型

Fig. 2 Model of joining secondary frequency regulation

其中 K_i 是 AGC 调节指令积分增益系数, 一般取值为 0.2~0.3 s。

2 发电机组的频率调节

2.1 无再热单火力机组的一次调频

独立的控制区域：控制区内只有一台无再热的火力发电机组，装机容量为 600 MW (100 MW 的旋转备用容量)，在频率为 50 Hz 时，连接的负荷为 500 MW。我们取火力机组的 D_i 等于 1, M_i 等于 10, 火力发电系统调频参数见表 1。

表 1 火力发电系统的仿真模型参数

Table 1 Thermal power system simulation model parameters			
无再热火力发电机组	数值	再热火力发电机组	数值
R_1	5%	R_2	6%
T_{n1}	0.1	T_{n2}	0.1
T_{i1}	0.3	T_{i2}	0.3
		T_{R2}	25%
		C	8

区域的负荷在 2 s 时刻增加 6 MW 容量, 仿真系统在设计中的数据均采用标么值。把图 1 模型设定成如上参数时, 运行 Matlab 模型后, 得到无再热单火力机组的一次调频的频率变化, 如图 3 所示。

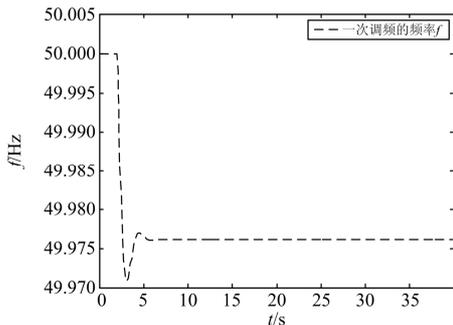


图 3 无再热单火力机组一次调频的频率变化曲线
Fig. 3 Frequency variation curve of primary frequency regulation for non-reheat single thermal unit

只有一次调频时, 区域 1 在 2 s 时刻出现幅度为 6 MW 的负荷增量, 计算区域的自然频率特性系数

$$K_g = \sum \frac{1}{R} = \frac{600}{50 \times 5\%} = 240 \text{ MW/Hz}$$

负荷的阻尼常数

$$D = \frac{500 \times 1\%}{50 \times 1\%} = 10 \text{ MW/Hz}$$

则系统在理论上应该稳定在偏离计划值的幅度为

$$\Delta f(\infty) = \frac{-\Delta P_L}{K_g + D} = \frac{-0.01 \times 600}{240 + 10} = -0.024 \text{ Hz}$$

经过数秒的减幅振荡, 最终稳定在与理论分析计算值附近。

2.2 无再热单火力机组的二次调频

根据图 2 加入的二次调频积分环节, 取二次调频的积分增益系数 $K_i = 0.25 \text{ s}$, 得到无再热单火力机组加入二次调频的频率变化, 如图 4 所示。

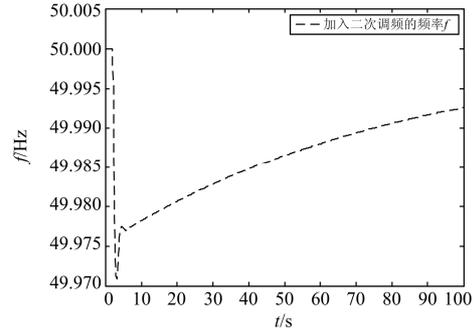


图 4 无再热单火力机组加入二次调频的频率变化曲线
Fig. 4 Frequency variation curve of joining the second frequency regulation for non-reheat single thermal unit

根据图 4 得到, 加入了二次调频后, 发电机组的频率调节性能得到了明显改善, 但调节时间过长, 所以需要加入其他机组进行共同调节。

2.3 单区域多机组的二次调频

控制区是指通过联络线与外部相连的局部电力系统, 通过调整控制区发电机组的有功功率, 维持联络线的交换功率和系统的频率在给定范围内^[9], 如图 5 所示。

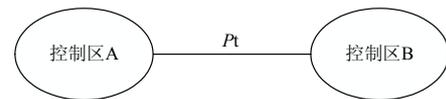


图 5 电力系统控制区模型

Fig. 5 Power system control area model

图 6 为一个控制区, 区中有两台火力发电机组, 分别为无再热火力发电机组和再热火力发电机组。

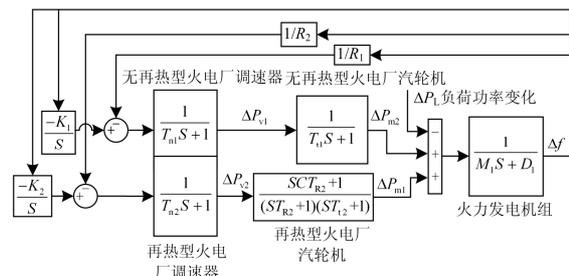


图 6 单区域多机组的模型

Fig. 6 Single area multi-units model

取表 1 的模型参数, 其中增加了再热火力发电机组, 该区域在 2 s 时刻增加 6 MW 容量负荷, 仿真系统在设计当中的数据均采用标么值。可以得到单

区域多机组加入二次调频的频率变化,如图7所示。

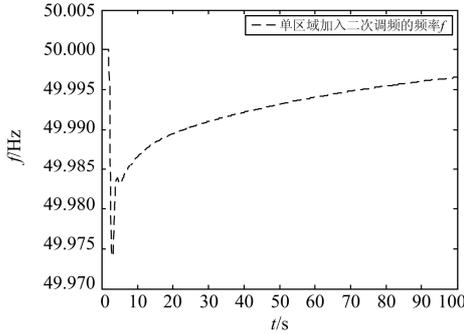


图7 单区域多机组加入二次调频的频率变化曲线
Fig. 7 Frequency variation curve of joining secondary frequency regulation for single area multi-units

可以明显从图7中得到,多机组的频率偏移幅度比单机组的频率偏移幅度小,而且调节时间比单机组的调节时间短。

3 互联电力系统多区域控制策略

3.1 定频率控制

定频率控制 FFC(Flat Frequency Control)模式一般用于互联电网的主系统和独立运行的电力系统中,该模式主要将频率控制为额定值。其区域控制偏差 ACE 的计算公式为

$$ACE = -10B[f - (f_0 + \Delta f_t)] \quad (5)$$

式中: B 为控制区的频率响应系数(MW/0.1Hz,为负值); f 和 f_0 分别为系统频率的实际值和额定值; Δf_t 为校正时差而设置的频率偏移。

3.2 定交换功率控制

定交换功率控制 FTC(Flat Tie-line Control)模式适用于互联电网中小容量的电力系统,该模式通过控制机组的有功功率出力来保持区域联络线净交换

功率偏差到零。其区域控制偏差 ACE 的计算公式为

$$ACE = \sum P_{ij} - (\sum I_{0j} - \Delta I_{0j}) \quad (6)$$

式中: $\sum P_{ij}$ 为控制区所有联络线的实际测量值之和; $\sum I_{0j}$ 为控制区与外区的交易计划之和; ΔI_{0j} 为偿还无意交换电量而设置的交换功率偏差。

3.3 联络线功率及频率偏差控制

联络线功率及频率偏差控制 TBC(Tie-line Bias Frequency Control)模式一般用于互联电力系统中,该模式需要同时监测 ΔP_l 和 Δf , 判别负荷的扰动发生在哪个系统。通过调节机组的有功功率,最终将因联络线功率、频率偏差造成的 ACE 控制到规定范围之内。其区域控制偏差 ACE 的计算公式为

$$ACE = \sum P_{ij} - (\sum I_{0j} - \Delta I_{0j}) - 10B[f - (f_0 + \Delta f_t)] = \Delta P_l - 10B\Delta f \quad (7)$$

3.4 风-火互补发电系统区域频率控制

系统 A 代表火力发电机组,系统 B 代表风力发电机组。这里用变速恒频双馈风电机组进行区域频率控制^[10-11],图8为风电的比例控制频率调节模块。

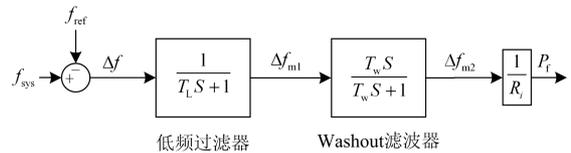


图8 比例控制频率调节的模型

Fig. 8 Proportional control frequency regulation model

比例控制环节采用了和常规同步发电机相似的一次调频环节,它的一个重要特征就是能更加充分利用风力发电快速注入功率的能力^[12-13]。

图9是加入了变速恒频双馈风电机组的多区域频率控制模型。

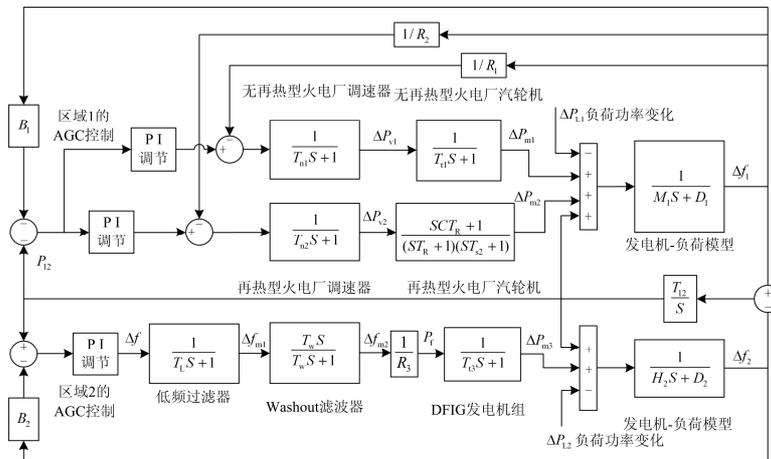


图9 加入风电机组的多区域模型

Fig. 9 Multi-regional model of joining the wind turbines

取表 1 火力发电系统的模型参数, 风力机组的惯性时间系数大约为 2~6 s, 这里我们取 $H_2 = 4$, 互联系统调频参数见表 2。

表 2 互联系统的仿真模型参数

Table 2 Interconnected system simulation model parameters

DFIG	数值	AGC	数值
T_L	0.1	T_{12}	3.42
T_W	1/6	K_P	0.7
T_{13}	0.2	K_I	0.13

区域 1 的负荷 ΔP_{L1} 在 2 s 时刻增加 6 MW 容量, 区域 2 的负荷 ΔP_{L2} 在 2 s 时刻无变化, 仿真系统在设计当中的数据均采用标么值。

3.5 TBC-FTC 控制模式

系统 A 采用 TBC 模式, 而系统 B 采用 FTC 模式。此时 A、B 两系统的区域控制偏差分别为

$$ACE_a = -\Delta P_t + K_a \Delta f \quad (8)$$

$$ACE_b = \Delta P_t \quad (9)$$

当加入风力机组作为一个控制区时, 对其中火力机组的控制区进行有功功率支援, 形成风-火互补发电。得到风电区的频率变化和加入风电前后两次火电区的频率变化如图 10 所示。

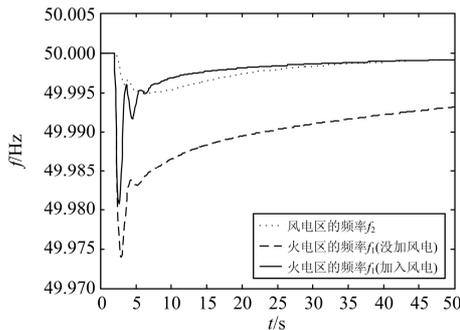


图 10 TBC-FTC 控制模式的频率变化曲线

Fig. 10 Frequency variation curve of TBC-FTC control mode

3.6 TBC-FFC 控制模式

系统 A 采用 TBC 模式, 而系统 B 采用 FFC 模式。此时 A、B 两系统的区域控制偏差分别为

$$ACE_a = -\Delta P_t + K_a \Delta f \quad (10)$$

$$ACE_b = K_b \Delta f \quad (11)$$

得到风电区的频率变化和加入风电前后两次火电区的频率变化如图 11 所示。

3.7 TBC-TBC 控制模式

A、B 两系统均采用 TBC 模式。此时 A、B 两系统的区域控制偏差分别为

$$ACE_a = -\Delta P_t + K_a \Delta f \quad (12)$$

$$ACE_b = \Delta P_t + K_b \Delta f \quad (13)$$

得到风电区的频率变化和加入风电前后两次火

电区的频率变化如图 12 所示。

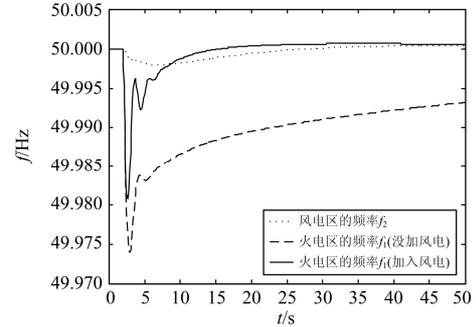


图 11 TBC-FFC 控制模式的频率变化曲线

Fig. 11 Frequency variation curve of TBC-FFC control mode

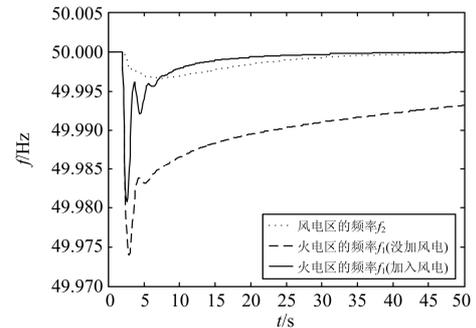


图 12 TBC-TBC 控制模式的频率变化曲线

Fig. 12 Frequency variation curve of TBC-TBC control mode

此时, 可以得到风-火互补发电系统 3 种控制模式联络线交换功率 P_{12} 的变化情况, 如图 13 所示。

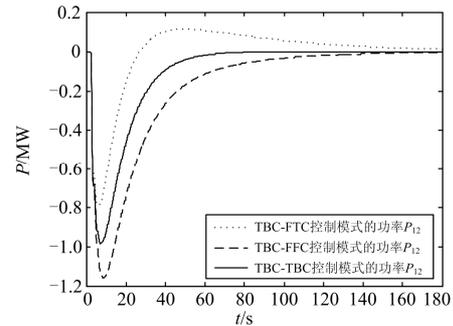


图 13 三种控制模式的联络线功率变化曲线

Fig. 13 Tie-lines power variation curve of three control modes

其中 $P_{12} < 0$ 时, 表示系统 2 流入系统 1 的功率增加, 等效于减少区域 1 的负荷并增加区域 2 的负荷, 反之亦然。此时, 支援过去的有功功率能很好地帮助火电区进行频率调节, 使其频率恢复至一定范围内, 随之交换功率也会逐渐恢复至零。

以上分析了 3 种区域频率控制模式, 其中负荷扰动都发生在具有火电机组的区域 1 中, 火电机组均采用 TBC 的控制模式, 具有风电机组的区域 2

无负荷扰动,它对区域1进行频率的辅助调节,分别采用了FTC、FFC、TBC模式,并对其进行仿真。在3种控制模式下,我们得到了频率和交换功率的仿真数据结果。

从仿真图和仿真数据表(表3、表4)可以看出,3种控制模式都能很好地对火电区进行功率支援,改善频率调节的性能(减小频率扰动幅度,缩短频率恢复时间)。通过对比可以看出,TBC-FTC控制模式,联络线出现了超调,功率支援力度最小,风电区频率偏移最大,火电区频率恢复最慢。TBC-FFC控制模式,联络线的功率支援力度最大,风电区频率偏移最小且火电区频率恢复最快。TBC-TBC控制模式,各项调节性能与TBC-FFC相差不大,联络线的功率恢复时间最短。所以,TBC-FFC控制模式和TBC-TBC控制模式的区域频率控制性能较好。

表3 风电区频率和联络线功率的仿真结果

控制模式	风电区最低频率/Hz	风电区频率恢复时间/s	联络线最大交换功率/MW	联络线交换时间/s
TBC-FTC	49.994 9	44.6	-0.787	287.0
TBC-FFC	49.998 0	16.3	-1.158	118.5
TBC-TBC	49.996 7	26.0	-0.982	90.8

表4 火电区频率的对比仿真结果

控制模式	加入风电的火电区最低频率/Hz	加入风电的火电区频率恢复时间/s	没加入风电的火电区最低频率/Hz	没加入风电的火电区频率恢复时间/s
TBC-FTC	49.980 7	45.1	49.974 0	190.7
TBC-FFC	49.980 7	10.8	49.974 0	190.7
TBC-TBC	49.980 7	16.2	49.974 0	190.7

4 结论

本文介绍了单机组火力发电的一次调频和二次调频。为了提高频率调节的性能,分析加入风力发电后风-火互补发电的区域频率控制,给出了3种区域频率控制策略方案,并对其进行仿真,在此基础上对各种控制模式中的参数进行对比分析。该仿真结果是在该模型参数设定的情况下得到的。

本论文提出的以风电作为辅助,支援火电进行频率调节,是一种比较新型的频率控制策略。针对本文的模型参数,给出了3种控制模式策略,对风电区域和火电区域的频率偏移以及恢复时间,联络

线的功率交换进行分析研究,讨论了3种控制模式的优劣。该仿真模型中省略了频率调节的评价,各机组本身的调节死区以及风电加入的经济性问题。这些方面也是以后大规模风电接入电网需要重点研究的方向^[14-16]。

参考文献

- [1] 张伯泉,杨宜民.风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势[J].中国电力,2006,39(6):65-69.
ZHANG Boquan, YANG Yimin. Status and trend of wind/photovoltaic power development[J]. Electric Power, 2006, 39(6): 65-69.
- [2] 王春亮,宋艺航.中国电力资源供需区域分布与输送状况[J].电网与清洁能源,2015,31(1):69-74.
WANG Chunliang, SONG Yihang. Distribution of power resource demand and supply regions and power transmission in China[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 69-74.
- [3] 叶键忠,邹俊雄,龙霏,等.地区电网火电机组孤网运行频率控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(7):123-128.
YE Jianzhong, ZOU Junxiong, LONG Fei, et al. Research on frequency control strategy for isolated grid operation of thermal power unit in regional power network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 123-128.
- [4] 彭喜云,刘瑞叶.变速恒频双馈风力发电机辅助系统调频的研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(11):56-61.
PENG Xiyun, LIU Ruiye. Research on the frequency regulation of aiding system of VSCF double-fed wind generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 56-61.
- [5] 颜伟,赵瑞锋,赵霞,等.自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):149-155.
YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 149-155.
- [6] 李正.大区互联电网自动发电控制AGC控制策略研究[D].成都:四川大学,2003.
LI Zheng. Study of AGC control strategy in interconnected power system[D]. Chengdu: Sichuan University, 2003.
- [7] 刘志红,刘明明.风水互补微电网的功率波动节能控制数学建模[J].电网与清洁能源,2015,31(10):123-127.
LIU Zhihong, LIU Mingming. Power fluctuations energy

- saving control mathematical modeling of the wind and hydro power complementary micro grid[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10): 123-127.
- [8] 周博. 电力系统频率控制中的负荷建模与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
ZHOU Bo. Electric load modeling and application in power system frequency control[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [9] 周念成, 付鹏武, 王强钢, 等. 基于模型预测控制的两区域互联电网 AGC 系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 46-51.
ZHOU Niancheng, FU Pengwu, WANG Qianggang, et al. Research on AGC of two area interconnected power system based on MPC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 46-51.
- [10] 倪琳娜, 罗吉, 王少荣. 含风电电力系统的频率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 235-241.
NI Linna, LUO Ji, WANG Shaorong. Frequency control of power system with wind power integration and dynamic stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 235-241.
- [11] 朱晓荣, 赵猛, 王毅. 双馈感应风力发电机组复合频率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 20-29.
ZHU Xiaorong, ZHAO Meng, WANG Yi. Composite frequency control strategy of doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 20-29.
- [12] 杨晓静, 徐科, 许兵, 等. 风电接入电网的评价体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7): 92-96.
YANG Xiaojing, XU Ke, XU Bing, et al. Evaluation system of wind power grid connection[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(7): 92-96.
- [13] 王松岩, 于继来. 含大规模风电系统的非 AGC 与 AGC 机组高峰协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 156-164.
WANG Songyan, YU Jilai. Coordinated dispatch regulation strategy between non-AGC units and AGC units with high wind power penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 156-164.
- [14] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [15] 杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波, 等. 双馈式风机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 63-69.
YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, et al. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.
- [16] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.
BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chunqing, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2015-09-02

作者简介:

姚亮(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电及并网技术、智能电网; E-mail: 1021352080@qq.com

陈峦(1973-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事计算智能及其应用、电力系统自动化方面的研究;

郑彬(1988-), 男, 在职硕士研究生, 研究方向为电力系统、智能电网。

(编辑 葛艳娜)