

引用格式:程林,王吉利,韩志勇,等.新能源接入对区域系统频率稳定的影响及机组改进控制策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):28-34.

Citation: CHENG Lin, WANG Jili, HAN Zhiyong, et al. Impact of new energy access on regional system frequency stability and unit improvement control strategy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 28-34.

新能源接入对区域系统频率稳定的影响 及机组改进控制策略

程林¹, 王吉利¹, 韩志勇², 柯贤波¹, 艾东平², 李文锋²

(1. 国家电网有限公司西北分部, 西安 陕西 710049; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:针对新能源接入比迅速增大,导致区域电网频率稳定性问题日益突出这一问题,研究接入比与频率稳定性的关系,并提出水电、火电主导调频的改进控制策略。分析发现,随着接入比的增大,区域电网的等值惯量变小,等值功-频调节能力降低,导致水电主导区域电网的静态、动态和暂态频率稳定性都降低,以及火电主导区域电网的静态、暂态频率稳定性降低,而动态频率稳定性基本不变。通过减小调差系数,在频率反馈通道附加微分环节,改善水电主导调频的全过程频率稳定性;在频率反馈通道附加比例微分环节,改善火电主导调频的全过程频率稳定性。仿真结果表明,影响原因分析合理,改进控制策略有效,对改善大比例新能源接入系统的频率稳定性具有重要参考价值。

关键词:新能源接入比;区域系统;频率稳定;功-频调节;控制策略

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.004 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2024)02-0028-07

Impact of new energy access on regional system frequency stability and unit improvement control strategy

CHENG Lin¹, WANG Jili¹, HAN Zhiyong², KE Xianbo¹, AI Dongping², LI Wenfeng²

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The new energy access ratio has rapidly increased in recent years, leading to increasingly prominent frequency stability issues in regional power grids. Therefore, this article studies the relationship between access ratio and frequency stability and proposes an improved control strategy for hydropower and thermal power-dominated frequency regulation. The analysis shows that as the access ratio increases, the equivalent inertia of the regional power grid decreases, and the equivalent power-frequency regulation ability decreases, resulting in a decrease in the static, dynamic, and transient frequency stability of the hydroelectric-dominated regional power grid; This leads to a decrease in the static and transient frequency stability of the power grid in the thermal power-dominated area, while the dynamic frequency stability remains unchanged. By reducing the adjustment coefficient and adding differential links to the frequency feedback channel, the overall frequency stability of hydropower-led frequency regulation is improved. Adding a proportional differential link to the frequency feedback channel improves the overall frequency stability of thermal power-led frequency modulation. The simulation results indicate that the analysis of the influencing factors is reasonable and that the improved control strategy is effective. This study has significant reference value for improving the frequency stability of large-scale new energy access systems.

Key words: new energy access ratio; regional systems; frequency stability; power-frequency regulation; control strategy

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-05-06

基金项目: 国家电网公司西北分部重点科教项目(SGTYHT/21-JS-223)

通信作者: 韩志勇(1980—), 男, 博士, 主要从事电力系统安全稳定研究; E-mail: hanzhiyong@epri.sgcc.com.cn

频率稳定问题并不是当下出现的新问题。在传统火电主导的电力系统中,从蒸汽母管并联方式过渡到单元机组的炉—机互联的单元式,导致蒸汽容量及转子惯性相对变小,且数字式功—频电液调节系统一次调频能力不足^[1-2],频率稳定问题开始突显。水电占比增大后,由于其功—频调节的水锤效应^[3],也存在频率稳定问题。因此,2004年电气与电子工程师协会/国际大电网会议定义了频率稳定性^[4]。

近年来,在“碳达峰、碳中和”大背景下,光伏、风电新能源的占比迅速增大,由于频率失稳引起大规模新能源机组脱网事故频发^[5-8]。例如,2016年澳洲的“9·28大停电”事故^[9],持续时间近10 h。2019年英国“8·9大停电”事故^[10],持续了约1.5 h。由于澳洲、英国发电结构中新能源总占比接近50%,事故导致其电网频率迅速跌落,最终致使系统频率崩溃。

在分析频率稳定的机理时,早期的关注点集中在系统转动惯量方面,后来发现机组功—频调节能力也是重要因素。高比例新能源接入后,系统等值惯量及功—频调节能力都发生了变化,故相关研究围绕这2个因素展开分析,发现新能源接入后等值惯量降低、调节能力变弱,导致频率稳定性降低,故提出相关控制策略,但都没有分析扰动后,从暂态、动态到稳态(即静态)的全过程频率稳定性^[11-20]。

新能源接入的区域电网有不同调频特征。例如我国西北、西南电网,风电及光伏发电分别接入以火电、水电主导调频的区域系统。现有文献未见全面分析,故本文以文献[14]所提指标,从暂态、动态到静态的全过程,分析新能源接入对水电、火电主导调频电网的频率稳定性的影响;针对2种主导调频方式,研究其改进控制策略,以全面提高区域电网的暂态、动态、静态频率稳定性。

1 新能源接入后的系统频率模型

1.1 接入比对系统惯量及调差系数的影响

设某区域系统中,除了常规机组,还有大规模风电及光伏等新能源接入,直流外送富裕功率,如图1所示。当新能源有功出力及负荷波动时,常规机组需与之平衡。

设该区域系统新能源的有功占比为

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^m P_{NSj}}{\left(\sum_{i=1}^n P_{Gi} + \sum_{j=1}^m P_{NSj} \right)} \quad (1)$$

式中, P_{NSj} 、 P_{Gi} 分别为新能源站 j 、常规机组 i 的有功出力; m 、 n 分别为新能源站及机组数量。

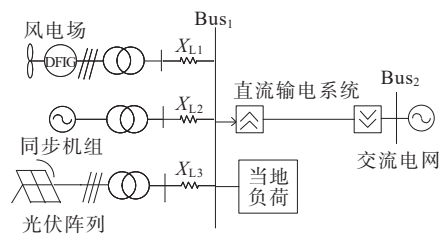


图1 新能源接入的区域系统

Figure 1 Regional system for new energy access

若不计新能源的惯量,则新能源接入前、后,该区域系统等值惯量的标么值分别为

$$H_{G\Sigma} \approx \frac{\sum_{i=1}^n W_{Gi}}{\sum_{i=1}^n P_{Gi}} \quad (2)$$

$$H_{NSG\Sigma} \approx \frac{\sum_{i=1}^n W_{Gi}}{\left(\sum_{i=1}^n P_{Gi} + \sum_{j=1}^m P_{NSj} \right)} \quad (3)$$

式中, W_{Gi} 为发电机 i 正常运行的动能。故由式(1)~(3)可得,新能源接入后,该区域系统的等值惯量变为

$$H_{NSG\Sigma} \approx (1 - \eta) H_{G\Sigma} \quad (4)$$

若新能源有功出力对系统频率偏差无感,同理,新能源接入后,该区域系统电源的等值调差系数变为

$$R_{NSG\Sigma} \approx \frac{1}{1 - \eta} R_{G\Sigma} \quad (5)$$

式中, $R_{G\Sigma}$ 、 $R_{NSG\Sigma}$ 分别为新能源接入前、后的区域系统等值调差系数的标么值。

若采用电源的功—频静特性系数表示,则有

$$K_{NSG\Sigma} \approx (1 - \eta) K_{G\Sigma} \quad (6)$$

由式(4)~(6)可得,随着新能源接入比 η 的增大,区域系统的等值惯量变小,电源的功—频调节能力变弱,二者都会影响频率稳定性。

1.2 新能源接入后的区域系统频率模型构建

假设在区域系统中,发生 ΔP_L 的负荷扰动,导致系统频率变化 Δf ,则新能源接入前:

$$\Delta P_{G\Sigma} - \Delta P_L = 2H_{G\Sigma} \frac{d\Delta f}{dt} + K_L \Delta f \quad (7)$$

新能源接入后:

$$\Delta P_{G\Sigma} - \Delta P_L = 2H_{NSG\Sigma} \frac{d\Delta f}{dt} + K_L \Delta f \quad (8)$$

式(7)、(8)中, $\Delta P_{G\Sigma}$ 、 $\Delta P_{NSG\Sigma}$ 分别为新能源接入前、后的等值机组有功变量; K_L 为负荷静特性系数。

由式(7)、(8)可得,新能源接入前、后的区域系统功—频特性函数分别为

$$G_{PF} = \frac{1}{2H_{G\Sigma} \cdot s + K_L} \quad (9)$$

$$G_{PB} = \frac{1}{2H_{NSG\Sigma} \cdot s + K_L} \quad (10)$$

区域系统内一般有火电、水电(包括抽水蓄能)常规机组,都采用功—频反馈调速控制方式。若以水电或火电机组主导调频,该区域系统的频率模型分别如图2、3所示,其中, G_{PID} 为比例—积分—微分控制器调节传递函数; G_T 为水轮机液压系统传递函数; G_S 为水轮机传递函数; G_{TS} 为汽轮机汽缸传递函数; G_{YS} 为汽轮机油动机传递函数。

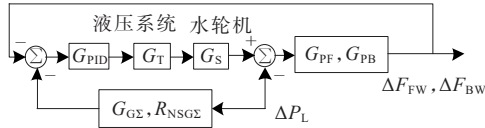


图2 水电机组主导的区域系统频率模型

Figure 2 Regional system frequency model dominated by hydroelectric units

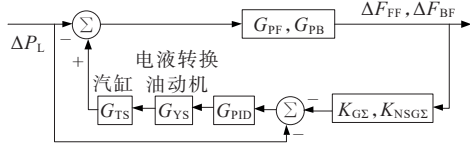


图3 火电机组主导的区域系统频率模型

Figure 3 Regional system frequency model dominated by thermal power units

2 新能源接入比对频率特性的影响

2.1 区域系统频率稳定性指标

区域系统发生负荷扰动时,由于机组转子的惯性,转速不会突变,区域系统的频率会经历一个从暂态、动态到静态的变化过程^[14],如图4所示。

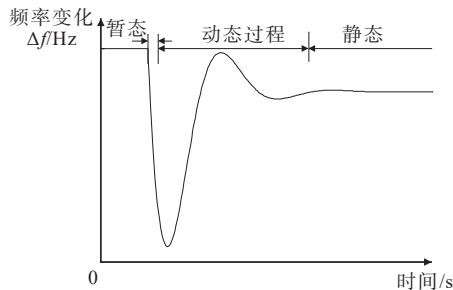


图4 负荷扰动后的区域系统频率典型变化过程

Figure 4 Typical variation process of regional system frequency after load disturbance

文献[14]定义了暂态、动态和静态频率稳定性指标,如下:

$$\begin{cases} S_T = 1/\Delta f'(t_{0+}) \\ S_D = \zeta \\ S_S = 1/\Delta f \end{cases} \quad (11)$$

式中, S_T 、 S_D 、 S_S 分别为暂态、动态、静态的频率稳定性指标; $\Delta f'(t_{0+})$ 为负荷扰动瞬间的频率变化率; ζ 为系统阻尼比; Δf 为静态频率偏差。各指标数值越大,则频率稳定性越好。

2.2 新能源接入比对静态频率稳定性的影响

如图2所示,水电主导的系统频率模型中各个环节的传递函数分别为

$$\begin{cases} G_{PID} = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \\ G_T = \frac{1}{T_T s + 1} \\ G_S = \frac{-T_w s + 1}{0.5 T_w s + 1} \end{cases} \quad (12)$$

式中, T_T 为接力器响应时间常数; T_w 为水锤效应系数,令 $G_0 = G_{PID} G_T G_S$ 。由图2可得新能源接入前、后,负荷扰动下的区域系统频率的传递函数分别为

$$\begin{cases} \frac{\Delta F_{FW}}{\Delta P_L} = -\frac{G_{PF} + R_{G\Sigma} G_0 G_{PF}}{1 + G_0 G_{PF}} \\ \frac{\Delta F_{BW}}{\Delta P_L} = -\frac{G_{PB} + R_{NSG\Sigma} G_0 G_{PB}}{1 + G_0 G_{PB}} \end{cases} \quad (13)$$

由终值定理可得新能源接入前、后,阶跃负荷 ΔP_L 扰动下的静态频率偏差分别为

$$\begin{cases} \Delta f_{FW} = -\lim_{s \rightarrow 0} (s \cdot \Delta F_{FW}) = \frac{-\Delta P_L}{K_L + 1/R_{G\Sigma}} \\ \Delta f_{BW} = -\lim_{s \rightarrow 0} (s \cdot \Delta F_{BW}) = \frac{-\Delta P_L}{K_L + 1/R_{NSG\Sigma}} \end{cases} \quad (14)$$

因 K_L 远小于 $1/R_{G\Sigma}$ 、 $1/R_{NSG\Sigma}$,故由式(14)可得:

$$\frac{\Delta f_{FW}}{\Delta f_{BW}} \approx 1 - \eta < 1 \quad (15)$$

在火电主导调频方式下,由图3可得新能源接入前、后的频率传递函数分别为

$$\begin{cases} \frac{\Delta F_{FF}}{\Delta P_L} = -\frac{(1 + G_0) G_{PF}}{1 + K_{G\Sigma} G_{PF} G_0} \\ \frac{\Delta F_{BF}}{\Delta P_L} = -\frac{(1 + G_0) G_{PB}}{1 + K_{NSG\Sigma} G_{PB} G_0} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可得,在负荷扰动下的静态频率偏差分别为

$$\begin{cases} \Delta f_{FF} = \frac{-2\Delta P_L}{K_L + K_{G\Sigma}} \\ \Delta f_{BF} = \frac{-2\Delta P_L}{K_L + K_{NSG\Sigma}} \end{cases} \quad (17)$$

由于负荷的功—频特性 K_L 一般远小于机组的 $K_{G\Sigma}$,故由式(16)可得:

$$\frac{\Delta f_{FF}}{\Delta f_{BF}} \approx 1 - \eta < 1 \quad (18)$$

由式(15)、(18)可得:无论是水电还是火电主导调频,新能源接入后,区域系统在负荷扰动下的静态频率稳定性均变差;接入比越大,则静态频率稳定性越差。

2.3 新能源接入比对动态频率稳定性的影响

针对如图2所示水电主导系统,为简化分析,忽略较小 T_T 和积分与微分环节,将式(13)降阶为二阶,可得新能源接入前、后区域系统阻尼比分别为

$$\begin{cases} \zeta_{FW} \approx \frac{2H_{G\Sigma} + 0.5T_w K_L - K_p T_w}{2\sqrt{H_{G\Sigma} T_w (K_p + K_L)}} \\ \zeta_{BW} \approx \frac{2H_{NSG\Sigma} + 0.5T_w K_L - K_p T_w}{2\sqrt{H_{NSG\Sigma} T_w (K_p + K_L)}} \end{cases} \quad (19)$$

忽略相对较小的参数后,则由式(19)可得:

$$\frac{\zeta_{BW}}{\zeta_{FW}} \approx \frac{H_{NSG\Sigma}/H_{G\Sigma}}{\sqrt{H_{NSG\Sigma}/H_{G\Sigma}}} = \sqrt{1-\eta} < 1 \quad (20)$$

同理,针对如图3所示火电主导调频方式,由式(16)可得新能源接入前、后系统阻尼比分别为

$$\begin{cases} \zeta_{FF} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(2H_{G\Sigma} + T_T K_L)^2}{2H_{G\Sigma} T_T (K_L + K_{G\Sigma})}} \\ \zeta_{BF} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(2H_{NSG\Sigma} + T_T K_L)^2}{2H_{NSG\Sigma} T_T (K_L + K_{NSG\Sigma})}} \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)简化可得:

$$\frac{\zeta_{FF}}{\zeta_{BF}} \approx \sqrt{\frac{K_{NSG\Sigma}}{H_{NSG\Sigma}} \cdot \frac{H_{G\Sigma}}{K_{G\Sigma}}} \quad (22)$$

结合式(4)、(6),可得:

$$\zeta_{FF}/\zeta_{BF} \approx 1 \quad (23)$$

由式(20)、(23)可得:接入新能源后,水电主导调频区域系统的阻尼比略微变小;而火电主导调频区域系统,阻尼比几乎不变。故新能源接入对动态频率稳定性的影响不大。

2.4 新能源接入比对暂态频率稳定性的影响

对于水电主导调频区域,在扰动发生瞬间,由于频率死区,无法对频率偏差进行反馈,故仅能通过功率通道反馈,则系统暂态频率响应模型为

$$\begin{cases} \Delta F_{FW} = -\Delta P_L (G_{PF} + R_{G\Sigma} G_0 G_{PF}) \\ \Delta F_{BW} = -\Delta P_L (G_{PB} + R_{NSG\Sigma} G_0 G_{PB}) \end{cases} \quad (24)$$

根据式(25),可求得频率瞬间变化率为

$$\begin{cases} \Delta f_{FW}'(t_{0+}) \approx -\frac{R_{G\Sigma} K_p}{H_{G\Sigma} T_w} \Delta P_L \\ \Delta f_{BW}'(t_{0+}) \approx -\frac{R_{NSG\Sigma} K_p}{H_{NSG\Sigma} T_w} \Delta P_L \end{cases} \quad (25)$$

结合式(4)、(5),可得:

$$\frac{\Delta f_{FW}'(t_{0+})}{\Delta f_{BW}'(t_{0+})} \approx \frac{H_{NSG\Sigma} R_{G\Sigma}}{H_{G\Sigma} R_{NSG\Sigma}} = (1-\eta)^2 < 1 \quad (26)$$

同理,在火电主导调频方式下,由式(16)可得新能源接入前、后系统暂态频率响应模型分别为

$$\begin{cases} \Delta F_{FF} = -(1+G_0)G_{PF}\Delta P_L \\ \Delta F_{FW} = -(1+G_0)G_{PB}\Delta P_L \end{cases} \quad (27)$$

频率瞬间变化率为

$$\begin{cases} \Delta f_{FF}'(t_{0+}) \approx -\frac{\Delta P_L}{2H_{G\Sigma} T_T} \\ \Delta f_{BF}'(t_{0+}) \approx -\frac{\Delta P_L}{2H_{NSG\Sigma} T_T} \end{cases} \quad (28)$$

结合式(4)、(5),可得:

$$\frac{\Delta f_{FF}'(t_{0+})}{\Delta f_{BF}'(t_{0+})} \approx \frac{H_{NSG\Sigma}}{H_{G\Sigma}} = 1-\eta < 1 \quad (29)$$

由式(27)、(30)可得:无论是水电还是火电主导调频,新能源接入后,区域系统在负荷扰动下的暂态频率稳定性均变差;接入比越大,暂态频率稳定性越差。

3 改善频率稳定性的机组控制策略

3.1 水电机组改进控制策略的提出

针对水电主导调频系统,由式(14)、(26)可知,静态及暂态频率稳定性降低的原因是等值机组的调差系数变大,故在功率反馈通道,设置新的调差系数(减小),以提高机组功-频调节能力。

由式(20)可知,由于等值惯量减小,动态频率稳定性也略降低。故在频率反馈通道附加微分环节,以提高动态稳定性,如图5所示。

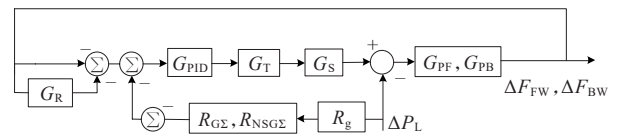


图5 改进后的水电主导功-频调节频率模型

Figure 5 Improved power frequency speed control system model for water motor unit

图5中,受端区域水电机组需要重新设置的调差系数 R_g 和微分环节的系数 T_R 计算如下:

$$\begin{cases} R_g = (1-\eta)R_{NSG\Sigma} \\ G_R = T_R s \end{cases} \quad (30)$$

由图3可得附加改进控制策略后的区域系统频率响应模型为

$$\frac{\Delta F_{GW}}{\Delta P_L} = -\frac{(1+R_g G_0)G_{PB}}{(1+G_R)G_0 G_{PB} + 1} \quad (31)$$

式中, ΔF_{GW} 为机组附加改进控制策略后的频率增量。

为便于分析,将复杂系统模型降为二阶模型后,由式(31)可得系统阻尼比为

$$\zeta_{GW} = \frac{2H_{NSG\Sigma} + K_p T_R + 0.5T_w K_L - K_p T_w}{2\sqrt{(H_{NSG\Sigma} T_w - T_R T_w K_p)(K_p + K_L)}} \quad (32)$$

将其与新能源接入后的系统阻尼比 ζ_{BW} 相比可得:

$$\frac{\zeta_{GW}}{\zeta_{BW}} > 1 \quad (33)$$

由终值定理可求出机组采取改进策略后的频率静态偏差 Δf_{GW} 为

$$\Delta f_{GW} = -R_{G\Sigma} \Delta P_L \quad (34)$$

则式(34)可变化为

$$\Delta f_{GW} = \Delta f_{FW} = (1 - \eta) \Delta f_{BW} \quad (35)$$

在扰动瞬间可求得系统频率响应为

$$\Delta F_{GW} = -\Delta P_L (G_{PB} + R_g G_0 G_{PB}) \quad (36)$$

由式(36)可求得扰动瞬间频率变化率为

$$\Delta f_{GW}'(t_{0+}) \approx -\frac{R_g K_p}{H_{NSG\Sigma} T_w} \Delta P_L \quad (37)$$

故

$$\frac{\Delta f_{GW}'(t_{0+})}{\Delta f_{BW}'(t_{0+})} = 1 - \eta < 1 \quad (38)$$

基于以上理论分析可知,水电机组调速系统附加改进控制策略后,区域系统频率暂、动、静态特性均得到改善。

3.2 火电机组改进控制策略的提出

同理,对火电机组提出改进控制策略:在频率反馈通道,附加比例—微分环节,在减小等值调差系数的同时,增大系统阻尼,以提高系统动、静态频率稳定性。改进后的功—频调速系统如图6所示。

图6中:

$$G_{PD} = K_C + \frac{K_d s}{s + K_d/T_d} \quad (39)$$

式中, K_C 为附加比例系数; K_d 为微分增益; T_d 为微分时间常数。

与采取改进控制策略前相比,有:

$$\begin{cases} \frac{\Delta f_{GF}'(t_{0+})}{\Delta f_{BF}'(t_{0+})} \approx \frac{T_T}{T_{TR}} < 1 \\ \zeta_{GF} \approx \sqrt{\frac{H_{G\Sigma}^2 \cdot K_{NSG\Sigma}}{H_{NSG\Sigma}^2 \cdot K_{G\Sigma}}} \approx \sqrt{\frac{1}{1 - \eta}} > 1 \end{cases} \quad (40)$$

由式(40)可知,火电机组调速系统附加改进控制策略后,区域系统频率动、静态特性均得到改善。

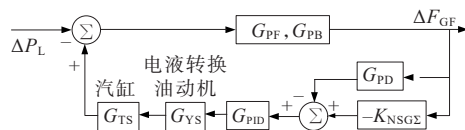


图6 改进后的火电主导功—频调节频率模型

Figure 6 Improved model of power frequency speed control system for thermal motor unit

4 算例分析

4.1 接入比对水电主导调频区域系统频率特性的影响

设区域系统总额定容量为10 GW,死区环节范围为0.03 Hz,水电主导调频区域系统水电机组调速控制模型如图5所示。根据文献[21],调速系统各典型参数可取为 $G_{PID} = 8 + 3/s + 0.5s/(0.28s + 1)$, $T_T = 0.1s$, $T_w = 0.5s$, $H_{G\Sigma} = 5s$, $R_{NSG\Sigma} = 0.044$, $T_H = 0.2s$ 。

设火电主导调频区域系统总额定容量为10 GW, $K_L = 0.5$, $H_{G\Sigma} = 5.0s$, $K_{G\Sigma} = 20$,死区环节范围为0.05 Hz。火电机组调速系统详细模型如图6所示,其中, $G_{PID} = 8 + 0.4/s + 200s/(s + 200)$ 。

设在 $t = 10s$ 时刻,系统发生+7%的负荷功率扰动,新能源接入比分别取15%、25%。新能源接入前、后,水电、火电主导调频的区域系统频率响应如图7所示。

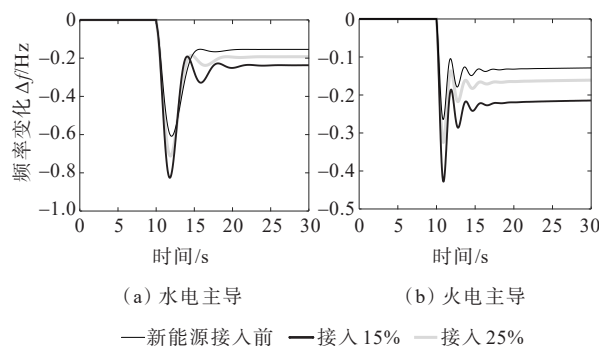


图7 接入比对水电、火电主导区域系统频率特性的影响

Figure 7 Influence of access ratio on the frequency characteristics of hydroelectric thermal power dominant regional systems

由图7可得:

1) 新能源接入后,对于水电主导调频的区域系统,负荷发生扰动,系统频率静态、动态、暂态特性均变差;

2) 新能源接入后,对于火电主导调频的区域系统,负荷发生扰动,系统频率静态、暂态特性均变差。

4.2 机组采取改进控制策略后的频率稳定性

水电、火电主导调频分别采用如图5、6所示的改进控制策略,其中 $T_R = 0.22s$, $R_g = 0.033s$, $T_d = 2s$, $K_{CS} = 5$ 。设接入比取25%,在+7%的负荷扰动下,控制方式改进前、后的频率响应如图8所示。

由图8可得:

1) 对于水电主导调频区域系统,机组采取改进控制策略后,相较于新能源接入前,系统频率静态、动态、暂态特性均得到改善;

2) 对于火电主导调频区域系统,机组采取改进控制策略后,相较于新能源接入前,系统频率静态、动态特性均得到改善。

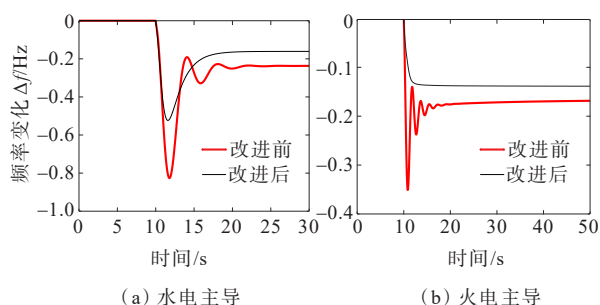


图8 水电、火电主导调频改进控制策略后的系统频率特性
Figure 8 System frequency characteristics after improving control strategy of hydropower and thermal power led frequency modulation

5 结语

针对水电、火电主导调频的区域系统,分析了新能源接入比与区域系统静态、动态、暂态频率稳定性的关系,得出以下结论。

1) 在静态、暂态频率稳定性方面,新能源接入后,水电、火电主导的区域系统稳定性均变差,且随着接入比的增大,变得更差。

2) 在动态频率稳定性方面,接入新能源后,水电主导的区域系统稳定性略微变小;而火电主导的区域系统稳定性几乎不变。

3) 新能源接入比对静态、暂态频率稳定性影响较大,对动态频率稳定性的影响较小。

据此,对水电主导的调频控制改进策略为:在功率反馈通道,增大调差系数;在频率反馈通道,附加微分环节。对火电主导调频的区域系统提出改进策略为:在频率反馈通道附加比例—微分环节。理论和仿真分析均表明,采取改进策略后,提高了区域系统的动态、静态、暂态频率稳定性。研究对

改善大比例新能源接入系统的频率稳定性具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 竺炜,谭喜意,唐颖杰,等. 汽轮发电机组一次调频性能的分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(24):52-55+79.
ZHU Wei, TAN Xiyi, TANG Yingjie, et al. Analysis and research on primary frequency modulation of the turbine generation unit[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(24):52-55+79.
- [2] 高嵩,李军,宋辉,等. 提升火电机组一次调频性能的火电-储能一体化系统研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(21):116-125.
GAO Song, LI Jun, SONG Hui, et al. An integrated thermal power-energy storage system for improving primary frequency regulation performance of thermal power units[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(21):116-125.
- [3] 李威,朱玲,祁晓婧,等. 新能源自同步电压源接入电力系统频率特性分析[J]. 电力系统自动化,2023,47(17):38-46.
LI Wei, ZHU Ling, QI Xiaojing, et al. Frequency characteristic analysis for power system with integration of renewable energy by self-synchronous voltage source [J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(17):38-46.
- [4] KUNDUR P,PASERBA J,AJJARAPU V,et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [5] 金梦,朱鑫要,周前. 新能源对电网调峰特性影响定量评估及应用[J]. 高压电器,2023,59(4):70-76.
JIN Meng, ZHU Xinyao, ZHOU Qian. Quantitative assessment of influence of renewable energy on peak regulation characteristics of power grid and its application[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(4):70-76.
- [6] 张剑云,李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3498-3507.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE,2020, 40(11):3498-3507.
- [7] 张冠锋,杨俊友,王海鑫,等. 基于虚拟同步机技术的风储系统协调调频控制策略[J]. 电工技术学报,2022,37(S1):83-92.
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, WANG Haixin, et al. Coordinated frequency modulation control strategy of wind storage system based on virtual synchronous machine technology[J]. Transactions of China

- Electrotechnical Society,2022,37(S1):83-92.
- [8] 张子扬,张宁,杜尔顺,等.双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J].中国电机工程学报,2022,42(1):1-25.
ZHANG Ziyang,ZHANG Ning,DU Ershun,et al.Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J].Proceedings of the CSEE,2022,42(1):1-25.
- [9] 曾辉,孙峰,李铁,等.澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J].电力系统自动化,2017,41(13):1-6.
ZENG Hui,SUN Feng,LI Tie,et al.Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J].Automation of Electric Power Systems,2017,41(13):1-6.
- [10] 孙华东,许涛,郭强,等.英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6183-6192.
SUN Huadong,XU Tao,GUO Qiang,et al.Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th,2019 and its enlightenment to power grid in China[J].Proceedings of the CSEE,2019,39(21):6183-6192.
- [11] 王进钊,严干贵,刘侃.基于交替方向隐式平衡截断法的直驱风电场次同步振荡分析的模型降阶研究[J].发电技术,2023,44(6):850-858.
WANG Jinzhao,YAN Gangui,LIU Kan. Research on model reduction of direct drive wind farm subsynchronous oscillation analysis based on alternating direction implicit balanced truncation method[J].Power Generation Technology,2023,44(6):850-858.
- [12] 屈兴武,王栋,马天诚,等.支撑电网频率稳定的双馈风机一次调频控制需求分析[J].智慧电力,2023,51(10):38-46.
QU Xingwu,WANG Dong,MA Tiancheng,et al. Requirement analysis of DFIG primary frequency regulation control supporting grid frequency stability[J].Smart Power,2023,51(10):38-46.
- [13] 潘斌,彭嵩,余俊杰,等.考虑动态响应的虚拟发电厂频率—功率改进自适应下垂控制策略[J].电测与仪表,2023,60(4):92-98.
PAN Bin,PENG Song,YU Junjie,et al.Improved adaptive droop control strategy for frequency-power of virtual power plant considering dynamic response[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(4):92-98.
- [14] 竺炜,钟鹏,巫晓云.直流入网后的多态频率稳定性及机组控制策略[J].中国电机工程学报,2016,36(22):6122-6130.
ZHU Wei,ZHONG Peng,WU Xiaoyun. Multi-state frequency stability and power unit control strategy after DC access[J].Proceedings of the CSEE,2016,36(22):6122-6130.
- [15] 李华,李献伟,张鹏,等.考虑负荷频率特性的新能源场站一次调频控制方法[J].供用电,2022,39(1):81-87.
LI Hua,LI Xianwei,ZHANG Peng,et al. Primary frequency modulation control regulation of new energy stations considering the load frequency characteristic[J].Distribution & Utilization,2022,39(1):81-87.
- [16] 胡亚平,聂涌泉,何宇斌,等.基于ELM预测模型的高比例新能源电网改进频率控制策略[J].电网与清洁能源,2022,38(7):98-106.
HU Yaping,NIE Yongquan,HE Yubin,et al. Improved frequency control strategy for power grid with high proportion of renewable energy based on ELM prediction model[J].Power System and Clean Energy,2022,38(7):98-106.
- [17] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.
SUN Huadong,WANG Baocai,LI Wenfeng,et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J].Proceedings of the CSEE,2020,40(16):5179-5192.
- [18] 周涛,刘子诚,陈中,等.异步电机频率支撑能力分析及其等效惯量评估[J].电力工程技术,2022,41(4):18-24,107.
ZHOU Tao,LIU Zicheng,CHEN Zhong,et al. Frequency support capacity of asynchronous motor and its equivalent inertia evaluation[J].Electric Power Engineering Technology,2022,41(4):18-24,107.
- [19] 李东东,刘强,徐波,等.考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(22):24-33.
LI Dongdong,LIU Qiang,XU Bo,et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J].Power System Protection and Control,2021,49(22):24-33.
- [20] 袁敏,王俊杰,胡嘉琦,等.平衡频率与功率振荡的虚拟同步机惯量阻尼参数优化控制[J].电力科学与技术学报,2023,38(4):15-23+56.
YUAN Chang,WANG Junjie,HU Jiaqi,et al. Optimal control of inertia damping parameters of virtual synchronous machine with balance frequency and power oscillation[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(4):15-23+56.
- [21] 李振垚,甘德强,栾某德,等.基于全状态模型的自同步电压源并网系统频率稳定分析[J].中国电力,2023,56(5):182-192.
LI Zhenyao,GAN Deqiang,LUAN Moude,et al. Frequency stability analysis based on full state model in autonomous-synchronization voltage source interfaced power system[J].Electric Power,2023,56(5):182-192.