

频率的时空分布对低频减载的影响研究

樊艳芳¹, 钟显¹, 常喜强², 王衡², 周专³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830016)

摘要: 基于电网网架结构、发电机组分布、机组参数及负荷类型等因素的影响, 系统频率特性呈现为时空分布。由于系统频率是制定低频减载方案的依据, 致使低频减载装置不能按照设计的理想状态动作。针对某地区电网解网事故, 详细分析了功率缺额下系统频率的动态特性及低频减载装置的动作情况。基于频率的时空分布特性考虑低频减载装置动作后频率恢复效果、切负荷大小及切负荷类型等影响因子, 分析了负荷特性对频率的影响, 提出了分散切负荷和集中切大用户工业负荷的两种研究方案。研究结果阐明集中切大用户工业负荷可快速恢复系统的频率, 并对居民负荷影响较小。因此, 对实际电网运行、低频减载方案的制定具有重要的参考价值。

关键词: 频率; 频率特性; 时空分布特性; 第三道防线; 低频减载

Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution

FAN Yanfang¹, ZHONG Xian¹, CHANG Xiqiang², WANG Heng², ZHOU Zhuan³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China; 2. Xinjiang Communication Center for Power Dispatching, Urumchi 830002, China; 3. State Grid Electric Power Company Xinjiang Institute of Economic Research Technology, Urumchi 830016, China)

Abstract: With the impact of grid structure, generators distribution, generator units parameters, and load type, the system's frequency characteristics presents temporal and spatial distribution. However, system frequency is the reference for formulating the UFLS scheme, which makes the action of UFLS device unsatisfactory. Based on the grid splitting in some region, this paper analyzes the dynamic characteristics of system frequency and the action of UFLS device in detail under the power shortage. Considering the impact factors such as frequency recovery effect, load shedding values and its types, etc., it studies the influence of load characteristics on frequency and proposes two research programs including decentralized load shedding and centralized cutting industrial load of large consumer. The research results show that cutting industrial load of large user can quickly restore the system frequency and have smaller influence on the residents' load, therefore it has significant reference value on control strategy of frequency recovery in the grid operation and making the program of the UFLS.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367016).

Key words: frequency; frequency characteristics; temporal and spatial distribution; third-defense-line; UFLS

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0055-06

0 引言

随着全国经济的快速发展, 各地区有功功率负荷需求不断增大, 保证电能的供需平衡是频率稳定的重要条件。当电力系统中出现功率缺额时, 电力系统的频率低于额定值, 严重时将发生频率崩溃事

故。根据《电力系统安全稳定导则》把电网扰动分为三类, 针对各类扰动提出了第一、第二及第三道防线的控制措施。电力系统的第三道防线——低频减载作为安全运行的最后一道防线, 避免发生频率崩溃及大范围停电等一系列事故的连锁反应^[1]。传统的低频减载是应用离线仿真技术模拟系统中最大功率缺额情况下, 整定低频减载装置基本轮和特殊轮的减载负荷大小。随着电网的互联及运行方式的复杂, 该方案未考虑电网运行中多方面的动态因素,

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研重点项目 (XJEDU2011105); 国家自然科学基金项目 (51367016)

无法适应系统大发展、大联网的现状要求。

目前广泛研究的是自适应低频减载方案^[2-3],文献[4]将全网负荷看成一个综合负荷,利用不同时刻频率的变化率对总的负荷缺额进行分配,此方案忽视了电网中负荷的差异性。文献[5]考虑了负荷的关联度,依据负荷调节系数的差异及负荷等级确定切除负荷的顺序,但未考虑功率缺额下低频减载装置的动作位置及响应协调性。文献[6]针对低频减载动作差异提出了广域频率信息应用的改进措施。文献[7]提出了评估频率失稳的方法,分析了低频时不同容量的切机比例对电网频率的影响。文献[8]针对频率特性,对负荷和发电机的模型进行了对比研究,考虑频率特性下的参数辨识较为精确。综上,由于网架结构、发电机组分布、机组参数及负荷类型等因素,导致系统频率呈现时空分布特性,而系统频率特性是制定低频减载方案的依据,致使低频减载装置不能按照设计的理想状态动作,因此需要对低频减载方案进行研究^[9-12]。

本文以某地区电网解网事故分析频率的动态特性及低频减载动作情况,基于频率的时空分布特性,综合考虑频率的恢复效果、切负荷大小及切负荷类型等因素,提出了分散切负荷和集中切大用户工业负荷的研究方案。通过仿真分析,集中切大用户工业负荷可快速恢复系统的频率,并对居民负荷影响较小。因此,本文对实际电网运行、低频减载方案的制定具有重要的参考价值。

1 电力系统的频率特性

1.1 电力系统发电机的静态频率特性

根据发电机组自身的功率调节过程,把发电机组的有功功率与频率的关系称为发电机组的频率特性,如图1所示。

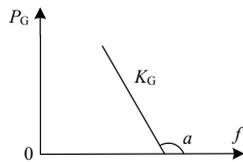


图1 发电机组的频率特性
Fig. 1 Frequency characteristics of generators

图1中直线的斜率为

$$K_G = \tan \alpha = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} \quad (1)$$

称其为发电机的单位调节功率,其数值表示频率发生单位变化时发电机输出功率的变化量,负号表示变化方向相反,即发电机输出功率增加,频率

是降低的。

实际应用中通常用调差系数 σ 来给出发电机组的参数特性,发电机组的调差系数是指由空载到满载时,转速(频率)变化与发电机输出功率变化比,即

$$\sigma = -\frac{f_N - f_0}{P_{GN}} = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} \quad (2)$$

式(2)中负号是因为调差系数 σ 习惯上取正值,而频率变化量与功率变化量的符号相反。标么值表示为

$$\sigma_* = -\frac{f_N / \Delta f}{\Delta P_G / P_{GN}} = \sigma \frac{P_{GN}}{f_N} \quad (3)$$

显然 K_G 与 σ 互为倒数关系,发电机组的调差系数或相应的单位调节功率是可以整定的,调差系数的大小对频率偏移的影响很大,调差系数越小,频率偏移越小。

1.2 电力系统负荷的静态频率特性

电力系统正常运行时,系统中负荷的有功功率随频率的变化特性称为负荷的静态频率特性^[13-14]。根据负荷与频率的分类,整个系统负荷功率与频率的关系为

$$P_D = a_0 P_{DN} + a_1 P_{DN} \frac{f}{f_N} + \dots \quad (4)$$

$$a_0 + a_1 + \dots = 1 \quad (5)$$

式中: P_D 为频率为 f 时系统的有功负荷; P_{DN} 是频率为 f_N 时系统的有功负荷; a_i 为与频率的 i 次方成正比时,负荷 P_{DN} 占的份额。

图2中直线的斜率为

$$K_D = \tan \beta = \frac{\Delta P_D}{\Delta f} \quad (6)$$

称其为负荷频率的调节效应系数,它反映了系统负荷对频率的自动调整作用。

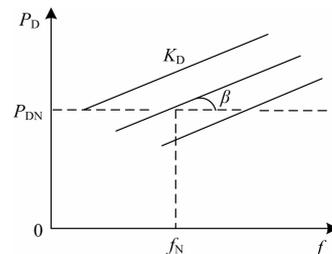


图2 负荷的频率特性

Fig. 2 Frequency characteristics of loads

1.3 电力系统频率的动态特性

当系统有功功率不平衡时,系统频率必然变化。系统频率从额定值变化到另一稳定值的过程,称为电力系统频率的动态特性^[15],如图3所示。

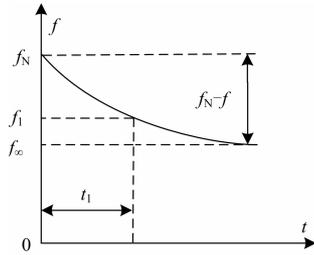


图3 系统频率的动态特性

Fig. 3 Dynamic characteristics of the system frequency

由图3可知,系统的频率变化不能突变,而是按一定的指数规律变化。当系统的频率在45~51 Hz变化(负荷的静态频率特性近似呈线性变化)、系统无备用容量时,其表达式为

$$f = f_{\infty} + (f_N - f_{\infty})e^{-t/T_f} \quad (7)$$

式中: f_{∞} 是有功功率不平衡时,由 f_N 变化到另一个稳定运行的频率; T_f 是系统频率变化的时间常数,它与系统等值机组惯性常数及负荷调节效应系统 K_L 等有关,一般在4~10 s,大系统的较大,小系统的较小。从 f_N 到 f_1 的变化时间 t_1 为

$$t_1 = T_f \ln \left| \frac{f_N - f_{\infty}}{f_1 - f_{\infty}} \right| \quad (8)$$

因此,实际运行的系统在网架结构、发电机组分布、机组参数及负荷类型等因素共同作用下,系统的频率动态特性更加突出,导致系统频率呈现时空分布特性。

2 低频减载装置的工作原理

2.1 低频减载装置有功功率缺额的确定

根据图4所示,电网运行正常时,电网A通过外送通道将一定的功率送给电网B。设当电网A发生故障时,电网B出现有功缺额为 P_V 。设此时要求系统频率恢复为 f_R (一般 $f_R < f_N$), K_L 为负荷调节效应系数, P_{DE} 为低频减载动作切除负荷, $\sum P_{L,N}$ 为系统额定负荷,则有

负荷调节效应系数

$$K_L = - \frac{(P_V - P_{DE}) / (\sum P_{L,N} - P_{DE})}{(f_R - f_N) / f_N} \quad (9)$$

令 $\Delta f_{R*} = (f_R - f_N) / f_N$, 所以

$$P_{DE} = - \frac{P_V - K_L \Delta f_{R*} \sum P_{L,N}}{1 - K_L \Delta f_{R*}} \quad (10)$$

根据系统不同运行方式及负荷分布情况等,可以由上式分析出在系统出现严重的功率缺额 P_V 时,在系统要求恢复频率 f_R 下确定接入低频减载装置

的负荷总功率 P_{DE} 。

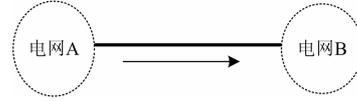


图4 功率传输示意图

Fig. 4 Power transmission

2.2 低频减载装置的基本工作原理

假定变电所母线馈线上有多条供电线路,由电力用户的重要性分为 n 个基本轮及 n 个特殊轮。每一级都装有低频减载装置,并且由测量元件、延时元件及执行元件构成。如图5所示。

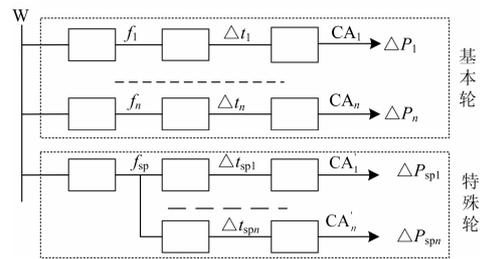


图5 低频减载装置的示意图

Fig. 5 Schematic frequency load shedding devices

基本轮的作用是根据系统频率下降程度依次切除不重要的负荷,当基本轮动作完以后,系统频率依然处于较低水平,则特殊轮测量元件启动,直至频率恢复到要求的给定值。根据规程规定:第一基本轮的动作频率整定不宜超过49.1 Hz,最后基本轮的动作频率限制低于47 Hz的时间不超过0.5 s,以避免事故进一步恶化^[15-17]。

3 新疆地区某电网低频减载动作分析

由图6可知,新疆通过750 kV通道与西北联网。若新疆电网750 kV乌北变电站1号主变发生跳闸,故障前乌昌电网通过该主变(2号主变处于检修状态)与西北主网单点联络。故障将造成乌昌电网的孤网运行,且发生故障后乌昌电网的频率跌至48.96 Hz,达到低频减载装置第一基本轮动作定值(整定值为49 Hz,时间为0.3 s),低频减载装置动作并切除该地区的负荷,被切负荷主要为工业、农业、照明和居民负荷。

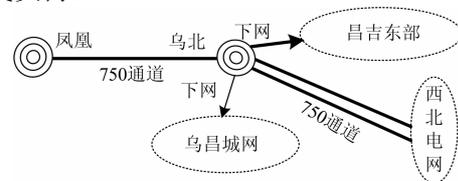


图6 局部电网示意图

Fig. 6 Schematic of local power grid

3.1 实际仿真反演分析

对乌北变 1 号主变故障跳闸后进行仿真反演，模拟计算系统频率变化情况如下：

0.8 s 时，乌北 1 号主变跳闸，乌昌电网与主系统解网，孤网系统频率从 50 Hz 开始降低；19.7 s 时，乌昌电网孤网频率最低跌至 48.99 Hz，造成乌昌电网地区低频减载装置动作，共切除乌昌电网负荷 19.82 万 kW；39.6 s 时，乌昌电网孤网频率恢复至 49.873 Hz。通过采集 PMU 数据与仿真监测多个地区厂站的频率对比可知，与实际情况基本吻合。图 7 所示为乌昌电网某一厂站频率仿真结果与 PMU 数据对比情况(其他地区厂站频率对比已略)。

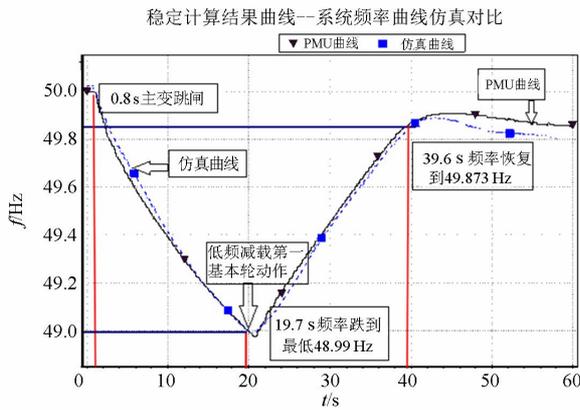


图 7 频率仿真结果与实际 PMU 曲线对比图
Fig. 7 Frequency simulation results compared with the PMU curve

由多个 PMU 数据可知，孤网后各地区的频率值存在一定的偏差，且呈现为时空分布特性，它与电网结构、机组分布等情况有很大的关系。由于频率的时空分布特性，导致部分场站的低频减载装置未能动作。

3.2 负荷特性对频率的影响分析

仿真分析中通过采用：60%感应电动机+40%恒阻抗、30%感应电动机+70%恒阻抗、100%恒电流、90%恒电流+10%感应电动机四种负荷模型，仿真模拟对频率的影响。负荷特性对频率影响的对比情况如图 8 所示。

进行计算对比后发现，在含有 40%恒阻抗与含有 70%恒阻抗的两种负荷模型中，故障后频率变化略快；但含 100%与 90%的恒电流模型中，故障后频率恢复效果较好。总体上来说，系统解网后四种负荷模型下的频率跌幅相差仅为 0.007 Hz，未对系统频率的变化造成实质性影响。

因此，工业、农业、照明及生活负荷中不同的用电设备构成了负荷的影响因素，由仿真分析可知，

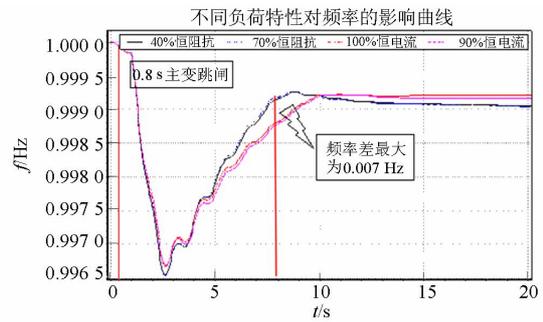


图 8 负荷特性对频率影响的对比情况
Fig. 8 Comparison of the frequency influenced by the load characteristics

解网事故中负荷特性对频率的影响较小。但低频减载装置所切除负荷中包含了照明和生活负荷，给当地的城乡居民用电造成了一定的影响。因此，考虑到居民供电可靠性与低频减载装置动作后的频率分布，原有的低频减载方案不能满足频率的动态特性，故本文提出了两种低频减载方案，方案一是第一基本轮分散配置切负荷；方案二是第一基本轮集中配置在大用户工业负荷，进行仿真对比分析。

4 两种方案的仿真对比分析

根据新疆乌昌电网负荷情况，工业负荷达到 77%。当乌北 1 号主变跳闸，系统频率的动态特性呈现为时空分布特性，并在乌北地区采用集中切大用户工业负荷，具有局部地区可快速恢复频率，对居民生活影响较小的优点。针对两种低频减载方案中不同的负荷组成(工业负荷采用 90%恒电流负荷模型，生活负荷采用 40%恒阻抗+60%感应电动机模型)，进行对比仿真分析。表 1 为各方案负荷的组成情况。

表 1 不同方案下的负荷组成

方案名称	总切除负荷/万 kW	工业负荷/万 kW	工业负荷所占比例	公用负荷/万 kW	公用负荷所占比例
方案一	19.82	10	50.45%	9.82	49.55%
方案二		19.82	100%	0	0

4.1 低频减载分散切负荷

乌昌地区采用低频减载方案一，并针对故障附近点(龙岗变)及离故障较远的点(昌吉变、古泉变及红电)监测频率变化。乌昌地区频率的时空分布曲线如图 9 所示。

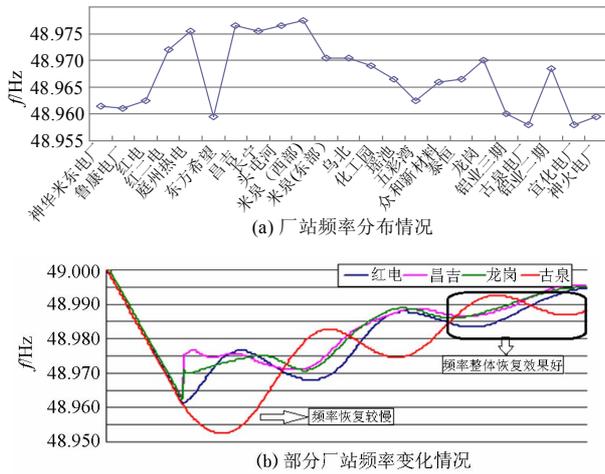


图 9 频率的时空分布曲线

Fig. 9 Curve of frequency temporal and spatial distribution

图 9(a)显示低频减载装置第一基本轮分散切除负荷后,最高频率为 48.977 5 Hz,最低频率为 48.956 Hz,偏差为 0.021 5 Hz。可知该地区的电厂所监测到的频率偏差较小,整体变化平缓;图 9(b)显示监测的场站在分散切除负荷后,频率恢复较为平缓,总体上差别较小。

4.2 低频减载集中切大用户工业负荷

对乌昌地区的低频减载方案进行调整,采用方案二,将第一基本轮低频切负荷量集中配置在乌北地区的大用户工业负荷。通过等量切除负荷进行仿真,并针对故障附近点(龙岗变)及离故障较远的点(昌吉、吉变及钢东变)监测频率变化情况。乌昌地区频率的时空分布曲线如图 10 所示。

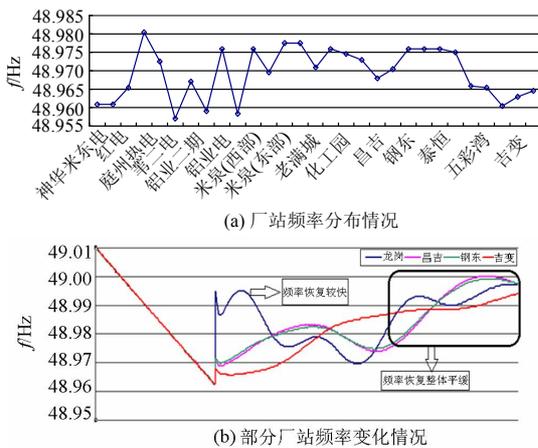


图 10 频率的时空分布曲线

Fig. 10 Curve of frequency temporal and spatial distribution

通过仿真计算结果图 10(a)、图 10(b)可知,在低频减载装置动作切除乌北地区大用户工业负荷后,乌北地区由于切除负荷量较大,局部地区频率

恢复较快,其余地区的频率恢复速度略滞后于乌北地区,但系统频率恢复情况整体上差别不大。并由图 10(a)可以看出,最高频率 48.980 5 Hz,最低频率 48.957 Hz,偏差在 0.023 5 Hz。同时可知,昌吉部分地区频率偏高,但昌吉东部地区的频率较昌吉西部低;由图 10(b)可知,集中切大用户工业负荷出现局部地区频率恢复较快(如龙岗变瞬时恢复快),其他地区则较为平缓。

对比两种方案,监测各厂站间的频率都具有差异性,验证了频率的时空分布特性。方案一,系统频率波动较小,整体恢复相对平缓;方案二,导致局部地区频率变化较大,恢复快,但其他地区频率恢复较为滞后。

5 结论

通过对系统频率的动态特性进行分析研究及对不同的低频减载方案应用于电网,得出下面结论:

- (1) 由于网架结构、发电机组分布、机组参数及负荷类型等因素导致系统频率呈现时空分布特性。
- (2) 仿真中系统的负荷特性未对系统频率的变化造成实质性影响,但影响频率的负荷特性因素主要是用电设备的差异及各类负荷所占的比例。
- (3) 由于系统频率的时空分布特性,影响了低频减载装置的动作情况,导致其动作不统一,动作状态不理想。

(4) 基于系统频率的时空分布特性,分散切负荷方案中频率整体变化平缓,而集中切大用户工业负荷中频率恢复相对较快。虽然二者总体上差别不是很明显,但集中切大用户工业负荷对照明和居民用电负荷影响较小,局部地区可快速恢复系统的频率。

因此,在保证系统稳定运行及居民负荷的情况下,本文依据频率的时空分布特性,对集中切大用户工业负荷的低频减载方案进行分析研究,对实际电网运行、低频减载方案的制定有一定的实际价值和意义。

参考文献

- [1] 丁书文. 电力系统微机型自动控制装置[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 152-161.
DING Shuwen. Power systems microcomputer automatic control device[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 152-161.
- [2] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 29-33.
WANG Jun, WANG Xiaoru, XIE Dapeng, et al. Investigation of under frequency load shedding on an isolated system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 29-33.

- [3] 柏丹丹, 和敬涵, 王小君, 等. 基于灰色关联分析的自适应低频减载[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 20-25.
BAI Dandan, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. Adaptive UFLS scheme based on grey correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 20-25.
- [4] ARULAMPALAM A, SAHA T K. Fast and adaptive under frequency load shedding and restoration technique using rate of change of frequency to prevent blackouts[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-8.
- [5] 李宇琦, 黄彦全, 何秋玲, 等. 考虑负荷频率调节效应系数的低频减载方案研究[J]. 电气开关, 2012(5): 34-37.
LI Yuqi, HUANG Yanquan, HE Qiuling, et al. Research of low frequency load shedding project considering load frequency adjustment effect coefficient[J]. Electric Switchgear, 2012(5): 34-37.
- [6] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [7] 赵渊, 吴小平, 谢开贵. 基于频率动态特性的电力系统频率失稳概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 212-220.
ZHAO Yuan, WU Xiaoping, XIE Kaigui. Probabilistic assessment for frequency instability of power system based on frequency dynamic characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 212-220.
- [8] 张恒旭, 刘玉田. 考虑频率特性的感应电动机负荷模型的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 132-138.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Comparative study of the induction motor load models with and without considering frequency characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 132-138.
- [9] 张恒旭, 刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 64-70.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of spacetime distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.
- [10] 贾萌萌, 丁剑, 张建成, 等. 弱受端小电网安控切负荷措施与低频减载措施的配合方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 74-81.
JIA Mengmeng, DING Jian, ZHANG Jiancheng, et al. Coordination between load shedding for safety and stability control and under-frequency load shedding in a small weak receiving power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 74-81.
- [11] 李常刚, 张恒旭, 刘玉田, 等. 考虑机组低频保护的电力系统暂态频率稳定评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 272-278.
LI Changgang, ZHANG Hengxu, LIU Yutian, et al. Power system transient frequency stability assessment considering unit underfrequency relay protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 272-278.
- [12] 李剑辉, 卢恩, 王宁. 基于系统恢复时间最短的快速切负荷机组布点方案[J]. 广东电力, 2013, 26(5): 63-66.
LI Jianhui, LU En, WANG Ning. Optimal placement of FCB units for the shortest duration of a system restoration[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(5): 63-66.
- [13] 熊小伏, 周永忠, 周家启, 等. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 43-47.
XIONG Xiaofu, ZHOU Yongzhong, ZHOU Jiaqi, et al. Study of under frequency load shedding scheme based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 43-47.
- [14] 赵强, 张丽, 王琦勇, 等. 系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 69-73.
ZHAO Qiang, ZHANG Li, WANG Qiyong, et al. Impact of load frequency characteristics on frequency stability of power systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 69-73.
- [15] 焦彦军, 韩天真, 杨琦. 计及调速器频率动态响应的低频减载优化方案的研究[J]. 电力科学与工程, 2014, 14(4): 222-225.
JIAO Yanjun, HAN Tianzheng, YANG Qi. Coordinate low frequency load shedding and the governor[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(4): 222-225.
- [16] 王聪. 基于功率缺额追踪的低频减载策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2013.
WANG Cong. Study on the under load shedding based on power shortage tracing[D]. Jilin: Northeast University, 2013.
- [17] 王超. 考虑电力系统频率动态特性的低频减载优化研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
WANG Chao. The optimization study on under frequency load shedding considering the frequency dynamic frequency of power system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.

收稿日期: 2014-06-29; 修回日期: 2014-07-24

作者简介:

樊艳芳(1971-), 女, 副教授、硕士生导师, 从事电力系统稳定与控制研究;

钟显(1989-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统稳定与控制研究; E-mail: zx18673760021@sina.com

常喜强(1976-), 男, 高级工程师, 从事电力系统分析与控制, 调度自动化研究。