

文章编号: 1000-582X(2012)02-022-06

电网频率崩溃的可靠性评估模型

芦晶晶¹, 沈力², 李柏青¹, 赵渊³, 吴小平³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 国家电网公司安监部, 北京 100031;
3. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 综合考虑频率崩溃发生的可能性和严重性, 提出了电网频率崩溃风险的可靠性评估模型和算法。该模型计及了系统发电方式、网络拓扑和元件故障的随机不确定性。详细推导了有功缺额出现后系统频率变化量的计算方法, 构建了反映频率崩溃的多种概率风险指标, 实现了对电网频率崩溃风险的定量评价。所提方法可为低频减载配置方案的合理性和机一网的协调性提供一定参考依据。基于非序贯蒙特卡洛仿真, 通过对 IEEE-RTS79 可靠性测试系统的评估分析验证了所提方法的正确性。

关键词: 频率崩溃; 可靠性评估; 电网

中图分类号: TM732

文献标志码: A

Research on reliability evaluation model for frequency collapse of power grid

LU Jing-jing¹, SHEN Li², LI Bo-qing¹, ZHAO Yuan³, WU Xiao-ping³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, P. R. China;
2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, P. R. China;
3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In order to comprehensively consider the possibility and the severity of frequency instability risk, this paper proposes the risk evaluation model and algorithm for frequency collapse of power grid. The uncertainties in generating dispatch, network topology and component outage are considered. The calculation method for system frequency variation is depicted while considering the active power deficiency arising from random failure of generating units, and then various probabilistic risk indices for frequency collapse are defined. The presented method can provide important reference information for evaluating the frequency collapse risk of power grid. The non-sequential Monte Carlo simulation-based results of IEEE-RTS79 show the correctness of the method.

Key words: frequency collapse; reliability evaluation; power grid

收稿日期: 2011-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977094); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512709103, 2007DA10512711208)

作者简介: 芦晶晶(1978-), 女, 高级工程师, 从事电力系统仿真分析计算、可靠性评估及风险分析研究工作, (E-mail)ljepri@163.com。

当非预期的随机事件导致电网有功功率缺额严重时,系统频率将在短时间内快速下降,如果低频减载动作不及时或者切负荷量不足,可能导致发电机低频保护动作,使事故进一步恶化,并可能引发系统频率崩溃^[1]。

频率崩溃可以是一种短期或长期现象。短期频率崩溃的时间在数秒至十几秒之内,主要受事故扰动大小、低频减载方案配置、系统旋转备用容量的数量和调节速度、系统等效惯性时间常数、发电机和负荷功率频率调节效应等的影响。目前对频率动态过程的研究主要基于系统统一频率的概念,在给定的扰动下,用单机带集中负荷的简化模型来模拟频率的暂态过程^[2-4]。在频率稳定性研究上,文献[5]将多机系统等效为单机系统,基于同步广域测量技术预测故障后系统的频率变化,根据稳态频率来决定是否启动低频减载等紧急控制措施;文献[6]基于最近一次潮流计算的雅克比矩阵因子表,近似求取系统功率缺额,通过代数运算求得系统稳态频率;文献[7]将保证频率稳定问题描述成非线性规划问题,提出了确定各轮动作频率和减载量的优化算法;文献[8-10]基于机电仿真,探讨了新能源发电设备的投入对频率稳定性的影响;文献[11]基于单机简化模型分析了不同负荷模型下的频率动态过程,文[12]验证了低频减载方案中优先切除频率调节效应系数较小的负荷将有利于系统频率的快速恢复。长期频率失稳关注受扰后持续时间较长的频率缓慢变化过程,例如汽轮机超速保护控制、元件饱和、火电机组锅炉动态、水电机组进水管和导水管动态等,时间范畴在数十秒到数分钟之内^[1]。文[13]考虑发电机调速器和自动电压调整器的饱和特性,仿真了长期频率失稳过程。

现有研究几乎都是基于确定性分析方法,难于客观反映系统设备随机故障、网络拓扑、发电方式等系统要素固有的内在不确定性。同时现有文献缺乏评价频率崩溃的概率量化指标,因此难以比较不同紧急控制措施的效果并从中择优。本文将可靠性评估方法应用到电力系统频率崩溃风险研究中,综合考虑频率失稳发生的可能性和严重性,提出了电力系统频率崩溃的可靠性评估模型和算法,构建了评价频率崩溃风险的多种量化指标,并对 IEEE-RTS79 测试系统进行了仿真验算。

1 电力系统频率变化计算

采用文献[2]推荐和使用等值单机模型,标么制的系统运动方程为

$$T_J \frac{d\omega_*}{dt} = T_{m*} - T_{e*} \quad (1)$$

因 $d\omega_*/dt = d\Delta\omega_*/dt = d\Delta f_*/dt$,且电角速度的变化不是太大,转矩标么值可近似地认为等于功率标么值,故(1)式可写成

$$T_J \frac{d\Delta f_*}{dt} = P_{m*} - P_{L*} \quad (2)$$

ω_* 为转子电角速度标么值; T_J 为系统惯性时间常数; T_{m*} 和 T_{e*} 分别为系统机械转矩和电磁转矩标么值; P_{m*} 和 P_{L*} 分别为发电机机械输入功率和负荷有功功率标么值; Δf_* 为以系统额定频率 f_N 为基准的频率偏差标么值。

1.1 系统没有旋转备用的情况

在简化分析时,一般认为系统已经没有备用容量,虽然此假设会使低频减载在功率缺额不大时就动作,但对频率的快速恢复和防止频率崩溃有利,所以令 $P_{m*} = P_{m0*}$,并保持不变。系统负荷的功率静态特性可表示为^[11,14]

$$P_{L*} = P_{L*}(V_*, f_*) \quad (3)$$

当考虑负荷的电压特性时,可用 k_{D*} 表示电压变化时负荷的频率调节效应系数,它代表了综合负荷的有功部分对频率变化的全微分

$$k_{D*} = \frac{dP_{L*}}{df_*} = \frac{\partial P_{L*}}{\partial f_*} + \frac{\partial P_{L*}}{\partial V_*} \times \frac{dV_*}{df_*} \quad (4)$$

式(4)中第一部分 $\partial P_{L*}/\partial f_*$ 可认为是电压恒定时负荷的频率调节效应系数,数值范围在 1.0~2.0 之间;对于综合负荷, $\partial P_{L*}/\partial V_*$ 可取为 0.94^[11];且频率降低时,系统发电机电压也随之降低,一般频率变化 1%,电压约变化 0.8%~2%,据此可估计出 k_{D*} 的范围。

所以考虑负荷的电压特性时,负荷功率 P_{L*} 可近似表示为

$$P_{L*} = P_{L0*} + k_{D*} \Delta f_* \quad (5)$$

式中: k_{D*} 为电压变化时负荷的功率频率调节效应系数。由式(2)和(5),系统运动方程可写为

$$T_J \frac{d\Delta f_*}{dt} = P_{m0*} - P_{L0*} - k_{D*} \Delta f_* \quad (6)$$

求得频率偏差标么制表达式为

$$\Delta f_*(t) = \frac{P_{m0*} - P_{L0*}}{k_{D*}} (1 - e^{-\frac{k_{D*}}{T_J} t}) \quad (7)$$

则频率有名制表达式为

$$f(t) = f_0 + f_N \times \frac{P_{m0*} - P_{L0*}}{k_{D*}} (1 - e^{-\frac{k_{D*}}{T_J} t}) \quad (8)$$

式中: f_0 为系统发生功率缺额瞬间时的初始频率,假设发生功率缺额瞬间,初始频率等于系统的额定频率 f_N 。

1.2 系统有旋转备用的情况

此时除考虑负荷的功率调节效应外,还应考虑发电机组调速系统的作用。假设调速器以一阶惯性环节表示为

$$T_G \frac{d\Delta P_{G^*}}{dt} + \Delta P_{G^*} = -k_{G^*} \Delta f^* \quad (9)$$

式中: ΔP_{G^*} 为发电机出力变化; T_G 为惯性环节的时间常数; k_{G^*} 为发电机单位调节功率。

此时式(6)相应地变为

$$T_J \frac{d\Delta f^*}{dt} = P_{m0^*} - P_{L0^*} + \Delta P_{G^*} - k_{D^*} \Delta f^* \quad (10)$$

求得考虑备用时的频率有名制表达式为

$$f(t) = f_0 + f_N \times \frac{P_{m0^*} - P_{L0^*}}{k_{s^*}} [1 + 2Ae^{-\sigma} \cos(Bt + \varphi)] \quad (11)$$

式中: k_{s^*} 为系统功率频率调节效应系数, $k_{s^*} = k_{D^*} + k_{G^*}$; T_f 为频率下降时间常数, $T_f = T_J/k_{D^*}$ 。

$$\tau = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_G} + \frac{1}{T_f} \right); B = \sqrt{\frac{k_{s^*}}{T_J T_G} - \tau^2};$$

$$A = \frac{1}{2BT_J} \sqrt{k_{s^*} k_{G^*}}; \varphi = \arctan \left[\frac{1}{B} \left(\frac{k_{s^*}}{T_J} - \tau \right) \right].$$

1.3 系统频率变化过程描述

低频减载要保证各轮动作的选择性,即前一轮动作后如果还不能抑制频率下降,则后一轮才能动作。下式中 f_{ri} 为第 i 轮的整定频率,第 i 轮在 t_{qi} 时刻启动,经过时延 t_{di} 后在 t_i 时刻动作切除部分负荷,此时系统频率用 $f(t_i)$ 表示。

可先由式(7)定义公式(12),该公式的意义为:在第 $i-1$ 轮动作切负荷后,如果还不能抑制频率的下降,在第 $i-1$ 轮至第 i 轮动作时间间隔 $t_{i-1} \sim t_i$ 内,可根据已知的频率变化量 Δf_{d^*} 计算频率变化所需时间。

$$\Delta t_{i-1}(\Delta f_{d^*}) = -\frac{T_J}{k_{D^*}} \ln \left(1 - \frac{k_{D^*} \Delta f_{d^*}}{P_{mi-1^*} - P_{Li-1^*}} \right) \quad (12)$$

假设在 $t=0$ 时刻,系统出现有功功率缺额,系统频率开始下降,则第一轮的动作时间为

$$t_1 = -\frac{T_J}{k_{D^*}} \ln \left[1 - \frac{k_{D^*} (f_{r1} - f_0)}{f_N (P_{m0^*} - P_{L0^*})} \right] + t_{d1} \quad (13)$$

如果第 $i-1$ 轮动作后仍不能制止频率的下降,则第 i 轮将启动,其动作时间为

$$t_i = t_{i-1} - \frac{T_J}{k_{D^*}} \ln \left[1 - \frac{k_{D^*} (f_{ri} - f(t_{i-1}))}{f_N (P_{mi-1^*} - P_{Li-1^*})} \right] + t_{di} \quad (14)$$

如第 i 轮动作后,功率缺额完全得到补偿,则系统频率将恢复。

在已知各轮的动作时间后,即可根据以下公式计算低频减载过程中频率的动态变化。

1)在 $t=0$ 时系统发生故障,则 $t=0$ 至 $t=t_1$ 时段内频率变化公式为

$$f(t) = f_0 + f_N \times \frac{P_{m0^*} - P_{L0^*}}{k_{D^*}} (1 - e^{-\frac{k_{D^*}}{T_J} t}) \quad (15)$$

2)在 t_1 时切除部分负荷,则 $t=t_1$ 至 $t=t_2$ 时段内频率变化公式为

$$f(t) = f(t_1) + f_N \times \frac{P_{m1^*} - P_{L1^*}}{k_{D^*}} (1 - e^{-\frac{k_{D^*}}{T_J} (t-t_1)}) \quad (16)$$

3)在 t_{i-1} 时再切除部分负荷,则 $t=t_{i-1}$ 至 $t=t_i$ 时段内频率变化公式为

$$f(t) = f(t_{i-1}) + f_N \times \frac{P_{mi-1^*} - P_{Li-1^*}}{k_{D^*}} (1 - e^{-\frac{k_{D^*}}{T_J} (t-t_{i-1})}) \quad (17)$$

无备用情况下计及低频减载的频率动态特性计算过程如上所述,有备用时计算过程比较复杂,并且考虑到故障发生后短时间内两种情况下的频率变化曲线比较接近,为简化计算,有备用时的各轮动作时间可近似按无备用情况计算,而频率的变化则按式(11)计算。

1.4 低频减载整定表

采用广泛应用的“逐次逼近”式低频减负荷方案,整定情况如表1所示。

表 1 低频减载整定表

轮次	动作频率/Hz	切负荷 Lshed./%
基本第一轮	49.0	3.14
基本第二轮	48.75	3.65
基本第三轮	48.50	4.36
基本第四轮	48.25	4.99
基本第五轮	48.00	5.52
基本第六轮	47.75	6.25
基本第七轮	47.50	6.91
基本轮总计		34.82
特殊第一轮	49.0	2.50
特殊第二轮	49.0	2.50
总计		39.82

减负荷分为基本轮与特殊轮两组,其中基本轮为快速动作轮,用于抑制频率的快速下降,频率的恢复由特殊轮来完成。基本轮共包括 7 轮,第一轮频率整定值为 49.00 Hz,各轮频率级差为 0.25 Hz,第七轮频率整定值为 47.50 Hz,基本轮延时 0.3 s,包括人为延时 0.2 s 和断路器动作时间 0.1 s;特殊轮共 2 轮,动作频率均为 49.0 Hz,分别延时 15 s 和 20 s。切负荷量为系统发电机总有功出力的 39.82%,其中基本轮切除 34.82%,特殊轮切除 5.00%。

2 元件可靠性模型

系统状态是所有元件状态的组合,蒙特卡罗模拟法按每个元件的概率参数进行随机抽样,得到系统各元件的抽样状态。

用指数分布来模拟发电机和变压器运行状态的不确定性。只考虑正常和停运两个状态的更替,且故障是彼此独立的。对某些大容量发电机组可用多状态模型来描述发电机容量的不确定性。

对于连接发电厂的重要输电线路,当这些输电线路故障时,发电厂的有功出力将受限,从效果上来说,这与发电机故障是一样的,不同的只是故障方式。本文用两状态概率模型来模拟所有连接发电厂的重要输电线路。

令 s_i 代表元件 i 的状态, $s_i=1$ 代表元件运行, $s_i=0$ 代表元件停运,随机抽样一个 $[0, 1]$ 区间的均匀分布随机数 R_i ,则有

$$s_i = \begin{cases} 1, & 1 \geq R_i \geq U_i; \\ 0, & U_i > R_i \geq 0. \end{cases} \quad (18)$$

式中: U_i 为元件 i 的停运概率,由元件 i 的失效率 λ_i 和修复率 μ_i 得到, $U_i = \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i)$ 。

具有 N 个元件的系统状态由矢量 s 表示为

$$s = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}. \quad (19)$$

3 频率崩溃风险指标

构建的风险指标体系包括期望切负荷量、系统频率失稳概率、累计频率失稳次数、导致频率失稳的最小功率缺额和低频减载各轮动作概率。

3.1 期望切负荷量

期望切负荷量是系统为防止频率失稳而必须切除的负荷,计算公式为

$$L_{\text{shedding}} = \sum_{k \in S} P_k \cdot L_{\text{shedding}_k} \cdot s_{\text{supply}_k}. \quad (20)$$

式中: S 为造成系统低频切负荷的故障集合; P_k 为系统处于状态 k 的概率; L_{shedding_k} 为状态 k 下切除负荷量的标幺值; s_{supply_k} 为系统状态 k 下故障后瞬间

发电机实际总有功出力。

3.2 系统频率失稳概率

低频减载的整定应与发电机的低频保护相配合,当频率低于系统最低允许频率时,即认为系统频率失稳。

$$P_f = \sum_{j \in C} P_{fj}. \quad (21)$$

式中: C 为系统频率失稳的故障集合; P_{fj} 为失稳状态 j 的概率。

3.3 累计频率失稳次数

累计频率失稳次数代表系统每年进入频率失稳状态的次数。

$$L = \sum_{j \in C} l(j), \quad (22)$$

$$l(j) = P(j) \sum_{k=1}^N \nu_k. \quad (23)$$

式中: $l(j)$ 为系统进入状态 j 的平均次数; $P(j)$ 为系统处于状态 j 的概率; ν_k 为第 k 个元件从状态 j 离开的转移率。如第 k 个元件处于工作状态,则 ν_k 是失效率,否则 ν_k 是修复率; N 为系统元件数。

3.4 导致频率失稳的最小功率缺额

该指标指的是在导致频率失稳的故障集 C 中,有功功率缺额的最小值。

$$PD_{\min} = \min\{PD_C\}. \quad (24)$$

式中: PD_C 为导致频率失稳的功率缺额集合。

3.5 低频减载各轮动作概率

此处定义的 P_{action_j} ($j=1, 2, \dots, 7$) 是指在各种系统状态下,低频减载动作至第 j 轮的单独概率,即第 j 轮为低频减载最后动作轮次的概率。

4 算例分析

根据上述模型和算法,编写了 Matlab 程序,用 IEEE-RTS79^[16] 可靠性测试系统进行了验算,其中机组惯性时间常数、机组功率频率单位调节功率、负荷功率频率调节效应系数等用于计算频率动态特性的相关参数参照文献[2, 4, 9]的假设。

1) 系统中额定容量小于 100 MW 的发电机单位调节功率标幺值取 17,大于等于 100 MW 小于 200 MW 的发电机取 20,大于 200 MW 的发电机取 25。

2) 系统中额定容量小于 100 MW 的发电机惯性时间常数取 5.8 s,大于等于 100 MW 小于 200 MW 的发电机取 8.1 s,大于 200 MW 的发电机取 9.3 s。

3) 考虑负荷电压特性时的负荷频率调节效应系数取 2.5,调速器一阶惯性环节时间常数为 8 s,系统最低允许频率取 47.0 Hz。

当蒙特卡罗抽样 80 000 次时,系统各项指标已经收敛,考虑系统无旋转备用和有 10% 旋转储备两

种情况,表 2 为系统峰荷 2 850 MW 下,各指标计算结果。

表 2 年峰荷 2 850 MW 下的频率稳定性计算结果

指标	$L_{shedding}/$ MW	P_f	$L/(次 \cdot$ $a^{-1})$	PD_{min} /MW	$P_{action1}$	$P_{action2}$	$P_{action3}$	$P_{action4}$	$P_{action5}$	$P_{action6}$	$P_{action7}$	P_{action}
无备用	122.168 4	0.003 2	2.700 8	924.486 5	0.117 4	0.048 6	0.152 7	0.072 2	0.013 5	0.020 7	0.011 6	0.436 7
10%的备用	87.934 5	0.002 1	1.687 3	972.155 9	0.039 6	0.148 9	0.076 6	0.036 6	0.013 9	0.014 3	0.008 7	0.338 6

从表 2 计算结果可知,当系统没有备用容量时,系统频率失稳的概率为 0.003 2,低频动作切负荷期望值为 122.17 MW,累计失效次数为 2.70 次/年;当系统投入 10% 的备用容量时,频率失稳概率下降为 0.002 1,是无备用时的 65.63%,切负荷期望为 87.93 MW,是无备用时的 71.98%,累计失效次数为 1.69 次/年,相当于无备用时的 62.47%,频率失稳概率、切负荷期望和累计失效次数指标的严重程度均较无备用时有明显的改善。

从各轮动作概率看,前 4 轮动作的概率较大,约 90% 的扰动事故都可在前 4 轮动作后使频率恢复,第 7 轮动作概率最小,说明只有很少部分的严重扰动会使得低频减载切至第七轮,在这部分严重故障中,无备用时有 27.59% (有备用时为 24.14%) 的事故会使得频率崩溃。比较各轮动作概率,对低频减载的整定具有一定的意义。

大容量机组在实际运行中往往有多种运行状态,即可能处于部分失效状态。对 IEEE-RTS79 系统中的 1 台 350 MW 和 2 台 400 MW 机组建立三状态概率模型。为便于比较,假设机组的停运概率不变,满额运行概率略微降低 0.02,如表 3 所示。表 4 给出了在最大负荷水平 2 850 MW 条件下,大容量机组模型不确定性对系统频率稳定性的影响,各指标的严重程度略有上升,这是由于机组期望停运容量的增大所引起。

表 3 发电机三状态模型状态概率表

发电机功率 /MW	状态概率		
	满额运行	降额运行	停运状态
350	0.90	0.02	0.08
400	0.86	0.02	0.12

表 4 不同发电机模型下系统指标的比较

指标	$L_{shedding}/$ MW	P_f	$L/(次 \cdot$ $a^{-1})$
有降额	129.258 8	0.003 7	2.987 1
无降额	122.168 4	0.003 2	2.700 8
相对差距/%	5.49	13.51	9.58

在系统负荷保持为某一固定负荷的假设下,图 1 给出了系统指标随系统峰荷变化的曲线,图中以切负荷量为参考,将频率失稳概率 P_f 、累计失效次数 L 、导致频率失稳最小功率缺额 PD_{min} 分别乘以不同的系数。可见各指标随系统峰荷的减少而降低。当系统负荷为 2 400 MW 时,频率崩溃的概率仅为 2.50×10^{-4} 。

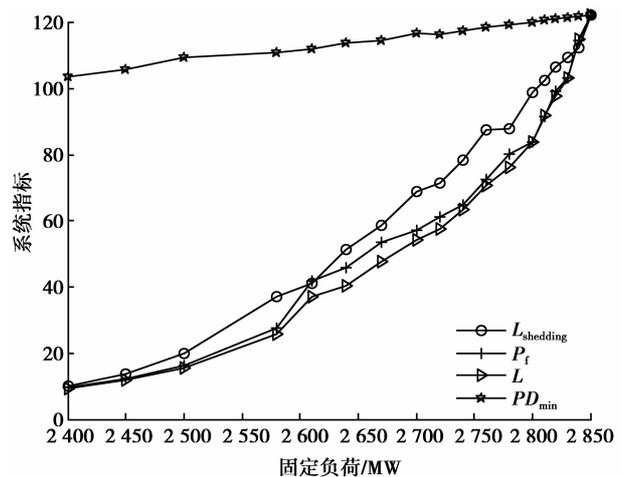


图 1 系统指标随系统峰荷的变化曲线

5 结 论

电力系统频率稳定的概率风险评估能够更加客观合理地评价电力系统的安全性。本文提出一种基于单机带集中负荷模型,使用状态抽样法来选择系统状态的方法来评估电力系统频率的稳定性。由于考虑了多种随机因素对频率稳定性的影响,因此能从多方面评价频率稳定的情况,克服了确定性频率稳定评估方法的不足,并可为合理配置低频减载方案提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 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]. Power System, 2004, 19 (2): 1387-1401.
- [2] 中华人民共和国电力行业标准. DL 428-91 电力系统自动低频减负荷技术规定[S]. 北京: 中华人民共和国能源部, 1991.
- [3] 薛禹胜, 任先成, WU Q H, 等. 关于低频低压切负荷决策优化协调的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 100-107.
- XUE YU-SHENG, REN XIAN-CHENG, WU Q H, et al. A review on optimization and coordination of under frequency/voltage load shedding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 100-107.
- [4] LEE D H A. A general-order system frequency response model incorporating load shedding analytic modeling and applications [J]. Power System, 2006, 21 (2): 709-717.
- [5] LARSSON M. An adaptive predictive approach to emergency frequency control in electric power systems [C] // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference, Dec 12-15, 2005, Seville, Spain, [s. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2005: 4434-4439.
- [6] 蔡泽祥, 徐志勇, 申洪. 电力系统频率稳定分析的直接法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(Z1): 13-17.
- CAI ZE-XIANG, XU ZHI-YONG, SHEN HONG. A direct method for frequency stability analysis of power system [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 1999, 11(Z1): 13-17.
- [7] CHIN V, DONG Z Y, SAHA T K, et al. Adaptive and optimal under frequency load shedding [C] // Proceedings of Australasian Universities Power Engineering Conference, Dec 14-17, 2008, Sydney, NSW, Australia, [s. l.]: Australasian Universities, 2008: 1-6.
- [8] ERLICH I, RENSCH K, SHEWAREGA F. Impact of large wind power generation on frequency stability [C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Jun 18-22, 2006, Montreal, Canada, [s. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2006: 1-8.
- [9] HELMY W, HEGAZY Y G, MOSTAFA M A, et al. Implementing distributed generation to mitigate under-frequency load shedding [C] // Proceedings of the 12th International Middle-East Power System Conference, Mar 12-15, 2008, Aswan, Egypt, [s. l.]: MEPCON, 2008: 136-140.
- [10] MAHATP, CHEN Z, BAK-JENSEN B. Underfrequency load shedding for an islanded distribution system with distributed generators [J]. Power Delivery, 2010, 25(2): 911-918.
- [11] LU Y, KAO W S, CHEN Y T. Study of applying load shedding scheme with dynamic D-factor values of various dynamic load models to Taiwan power system [J]. Power System, 2005, 20(4): 1976-1984.
- [12] 熊小伏, 周永忠, 周家启. 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): 48-51.
- XIONG XIAO-FU, ZHOU YONG-ZHONG, ZHOU JIA-QI. Study of underfrequency load shedding scheme based on load frequency characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51.
- [13] LIU J H, KROGH B H, ILIC M D. Saturation-induced frequency instability in electric power systems [C] // Proceedings of Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century Power and Energy Society General Meeting, Jul 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA, [s. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2008: 1-7.
- [14] 李爱民, 蔡泽祥. 基于轨迹分析的互联电网频率动态特性及低频减载的优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 171-177.
- LI AI-MING, CAI ZE-XIANG. Frequency dynamics analysis and load shedding assessment based on the dynamic simulation trajectory of interconnected power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 171-177.
- [15] LI W Y. Risk assessment of power systems-models, methods, and applications [M]. USA and Canada: Wiley & Sons-IEEE Press, 2005.
- [16] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system [J]. Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.

(编辑 张小强)