

## 基于单机负荷模型系统的紧急状态研究

张执超<sup>1,2</sup>, 王增平<sup>1</sup>, 方攀宇<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;  
2. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003)

**摘要:** 研究了电力系统的运行状态分类及其之间的转换关系, 建立简单的单机负荷模型系统的状态方程, 重点研究系统的稳态及紧急运行状态。电力系统中出现大的扰动, 系统中将出现有功、无功功率的不平衡。借助 Matlab 仿真分析系统频率和电压的运行轨迹变化, 结果表明, 频率是系统有功功率平衡的指示器, 而无功功率不平衡决定母线电压的变化, 在紧急状态下, 系统频率和电压稳定是不能完全解耦的。该研究对传统的低频减载策略设计和改进具有重要的指导意义。

**关键词:** 运行状态; 有功功率平衡; 频率稳定; 电压稳定; 切负荷; 紧急控制

### Study on system emergency state based on single generator load model

ZHANG Zhi-chao<sup>1,2</sup>, WANG Zeng-ping<sup>1</sup>, FANG Pan-yu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. College of Mechanical and Electric Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** The classification of system running state is determined and the transformational relation among them is studied. State equations are constructed about simple single generator-load model system. Steady state and the state of emergency running are focused. The occurrence of a large disturbance in a power system can arouse active and reactive power imbalances. System frequency and voltage trajectory are simulated and analyzed with Matlab. The results show that the frequency is an indicator of real power balance and reactive power imbalance determines the change of bus voltage. Frequency and voltage stability cannot be decoupled completely under emergency situations. This conclusion has an important guiding significance for the design and improvement of traditional under frequency load shedding (UFLS) strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50837002) and National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215200).

**Key words:** operating state; active power balance; frequency stability; voltage stability; load shedding; emergency control

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0104-06

## 0 引言

电力系统稳定和控制, 一直以来是科研人员研究和解决的重要问题, 当系统受到大的扰动, 例如大型发电机组或者重要联络线的跳开, 系统将会被迫分列为数个孤岛系统, 如果孤岛内发电功率大于负荷消耗的功率, 系统频率上升, 可以通过调整发电机出力或者切机来恢复系统安全稳定; 而一些孤岛将出现发电功率不能满足负荷功率的需求, 系统中发电机出现严重的过负荷, 系统频率将会迅速地

下降, 如果系统中无功容量不足, 负荷母线的电压完全由发电机内电势决定, 系统的频率和母线电压将会同时下降<sup>[1]</sup>, 带来系统的不稳定, 甚至崩溃。

本文首先研究了电力系统的运行状态及其分类, 阐明系统所处运行状态的特点和转换关系及应该采取的控制措施。以简单的单机负荷模型系统为研究对象, 因为该模型更接近系统出现孤岛运行时的运行情况, 能更直观地分析系统受扰后, 功角、频率和电压的轨迹变化情况, 便于分析和理解系统的稳定变化情况。采用经典的电力系统理论分析方法, 并结合电路理论的相关知识, 分析和建立了系统有功、无功功率约束的状态方程, 接着对系统的运行状态进行分析, 重点讨论其系统在稳定运行状

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50837002); 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2012CB215200)

态和紧急状态下电气量的变化情况。利用Matlab数学工具编程求解建立的系统状态方程, 并分别仿真分析系统受到有功、无功功率两种扰动情况下, 电压、频率和功角的变化情况, 并指出其运行状态的变化过程。系统紧急状态下切负荷控制策略, 对系统恢复稳定和保证系统安全运行具有重要的现实意义。

## 1 电力系统运行状态分析

电力系统运行状态是指在不同运行条件下, 系统和设备的工作情况, 根据不同的运行条件, 可以把电力系统的运行状态分为正常运行状态、警戒状态、紧急(极端)状态、系统崩溃和恢复状态(图 1)。各种运行状态以及相应的转换关系<sup>[2-7]</sup>, 详细的分类说明如下。

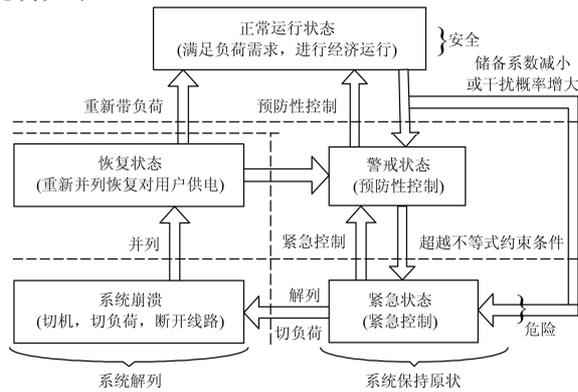


图 1 电力系统运行状态分类

Fig. 1 Classification of power system operating state

### 1) 正常状态

电力系统正常运行时, 系统元件负载不超过其额定值, 系统频率和母线电压处于正常水平, 应能供应全部负荷并有足够的稳定储备和有功、无功功率的备用容量。

电力系统正常运行发生概率较高的故障扰动时, 应能依靠其正确配置的措施, 如相应的网架结构及运行方式, 正常动作的保护和自动装置, 即可保护供电和可靠运行, 但允许系统的稳定储备和备用容量降低而进入一个潜在不够安全的状态, 即下述的警戒状态, 此时应采用预防性控制或值班员操作使系统及时恢复正常安全运行。

### 2) 警戒状态

在警戒状态下, 电力系统运行的等式约束和不等式约束条件均能满足, 仍能向用户供应质量合格的电能, 但是系统不能再承受大扰动事件的发生, 否则将导致损失负荷、母线电压和系统频率超越运行范围、功角不稳定、连锁反应、电压不稳定或某

些其他不稳定情况, 如果这一故障非常严重, 则可能使系统从警戒状态直接进入极端状态, 因此, 在运行中应尽早发现电力系统由正常运行状态向警戒状态的转变, 并及时采取预防性控制措施, 例如调整有功及无功功率, 消除潜在不安全因素, 尽快恢复系统到正常状态。

### 3) 紧急状态

在紧急状态下, 某些系统元件的负载超出其额定值, 某些母线电压降低并且/或者设备负荷超出其短时紧急额定值, 系统可能失去稳定。此时, 系统仍然是完整的, 应立即采取适当的紧急控制措施, 如: 故障清除、励磁控制、快关汽门、切机切负荷等, 保持系统稳定性和主电网完整性, 防止设备损坏和系统状态进一步恶化, 仍有可能使系统恢复到警戒状态或正常状态。

如果紧急控制措施未能采取或者不能奏效, 则系统将处于极端紧急状态, 系统难以保持稳定运行, 其结果是连锁反应停电并可能使系统的主要部分停机。在此状态下, 部分母线电压和系统频率可能严重超越运行范围, 系统中部分负荷可能严重超出其额定值而中断供电, 破坏了系统稳定而进一步扩大事故, 甚至造成系统崩溃。

### 4) 系统崩溃

系统崩溃是指系统稳定破坏、故障连锁反应、系统频率崩溃和电压崩溃, 导致大范围中断供电, 被解列的部分系统或机组需要较长时间才能重新启动及恢复供电。系统崩溃是电力系统运行中必须尽一切力量防止发生的, 系统必须考虑可能发生的极端严重故障情况, 配备完善可靠的系统解列、足够的低频和低压减负荷措施等, 以确保万无一失。

### 5) 恢复状态

系统崩溃后, 借助继电保护和自动装置将故障区隔离, 阻止事故的继续扩大, 待电力系统大体上稳定下来以后, 如果仍有部分设备运行于额定能力范围之内, 或者若干设备已重新启动, 则系统进入恢复状态。根据系统的实际情况, 系统可从这一状态恢复到警戒状态或正常运行状态。

目前, 对电力系统的运行状态没有严格和统一的定义, 通过这种电力系统运行状态的分析, 可以使比较清晰地了解电力系统运行的概念机在各种情况下控制的特点, 为研究电力系统紧急切负荷控制策略打下基础。

## 2 单机负荷模型系统分析

忽略发电机内部损失和电磁振荡, 具有非常简单的电压调整 AVR(Automatic Voltage Regulation,

AVR) 的单机带负荷系统模型图, 如图 2 所示。采用直轴暂态模型<sup>[8-9]</sup>, 得到发电机转子运动的平衡方程式为

$$\dot{\omega}_G = \frac{1}{H}(P_m - P_G - D_G \Delta\omega_G) \quad (1)$$

$$\dot{\delta}_G = \Delta\omega_G = \omega_G - \omega_0 \quad (2)$$

$$\dot{E}' = K_v(\dot{V}_{10} - \dot{V}_1) \quad (3)$$

其中:  $P_m$  和  $P_G$  分别为发电机的机械功率和电气功率;  $D_G$  为发电机频率反应的调节系数;  $\omega_0$  和  $\omega_G$  分别为系统额定频率和发电机的频率;  $V_{10}$  为系统的基本电压;  $K_v$  为电压调整增益。

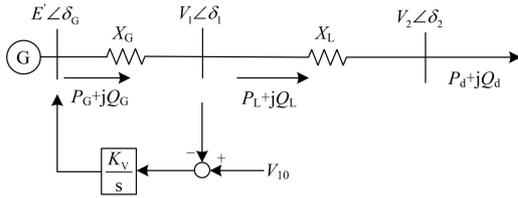


图 2 单机负荷系统模型图

Fig. 2 Single generator-load model system diagram

负荷采用恒定功率因数的负荷模型,  $k$  为无功和有功功率的比值, 得到负荷母线侧的频率和电压变化的方程式。

$$\dot{\delta}_2 = \Delta\omega_2 = \frac{1}{D_L}(P_L - P_d) \quad (4)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{\tau}(Q_L - Q_d) = \frac{1}{\tau}(Q_L - kP_d) \quad (5)$$

其中:  $P_d$  为系统负荷的有功功率;  $D_L$  为频率对负荷有功的影响系数;  $\Delta\omega_2$  为负荷母线的频率变化值;  $\tau$  为无功功率对电压变化的影响系数。

分析图 2, 忽略系统中的损耗, 设系统的总阻抗  $X = X_L + X_G$ , 传输线上的有功、无功功率传输是平衡的, 则系统的潮流方程满足:

$$P_G = P_L = \frac{E'V_2}{X} \sin(\delta_G - \delta_2) = \frac{V_1V_2}{X_L} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (6)$$

$$Q_G = -\frac{V_1^2}{X_G} + \frac{E'V_2}{X_G} \cos(\delta_G - \delta_1) \quad (7)$$

$$Q_L = -\frac{V_2^2}{X_L} + \frac{V_1V_2}{X_L} \cos(\delta_2 - \delta_1) = -\frac{V_2^2}{X} + \frac{E'V_2}{X} \cos(\delta_2 - \delta_G) \quad (8)$$

设  $\delta = \delta_G - \delta_2$ ,  $\delta' = \delta_1 - \delta_2$ ,  $\omega = \omega_G$ , 且  $\dot{\delta} = \omega - \omega_2$ , 把式(6)~式(8)的表达式代入式(1)、式(2)、式(4)和式(5)状态方程中, 得到系统受到扰动后的代数方程组为

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{1}{H}(P_m - \frac{E'V_2}{X} \sin \delta - D_G \Delta\omega) \\ \dot{\delta} = \omega - \frac{1}{D_L}(\frac{E'V_2}{X} \sin \delta - P_d) \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{\tau}(-\frac{V_2^2}{X} + \frac{E'V_2}{X} \cos \delta - kP_d) \\ \dot{E}' = K_v(V_{10} - V_1) \end{cases} \quad (9)$$

忽略系统的内部损耗, 系统的有功、无功功率潮流方程满足:

$$0 = \frac{V_1V_2}{X_L} \sin \delta' - \frac{E'V_2}{X} \sin \delta \quad (10)$$

$$0 = V_2^2(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X}) + \frac{E'V_2}{X} \cos \delta - \frac{V_1V_2}{X_L} \cos \delta' \quad (11)$$

通过求解方程式(9)~式(11), 便可以得到系统功角、电压和频率的运行关系, 进而可以分析系统受到扰动以后的变化轨迹。

### 2.1 系统稳定状态分析

当系统处于稳定运行状态时, 即满足系统有功和无功功率平衡的约束条件, 系统频率和电压的变化近似为 0, 电压偏差满足  $V_{10} - V_1 = 0$ , 由方程(9)变化得到

$$\begin{cases} 0 = P_m - \frac{E'V_2}{X} \sin \delta - D_G \Delta\omega \\ 0 = D_L \Delta\omega - \frac{E'V_2}{X} \sin \delta + P_d \\ 0 = -\frac{V_2^2}{X} + \frac{E'V_2}{X} \cos \delta - kP_d \end{cases} \quad (12)$$

当系统受到干扰之后, 若发电机的机械功率和负荷功率能够保持平衡( $P_m = P_d$ ), 发电机转子上不存在加速功率, 频率变化  $\Delta\omega = 0$ , 系统维持稳定运行状态, 可以确定变量( $E', V_2, \delta, \delta'$ )的平衡方程为

$$\begin{cases} 0 = P_d - \frac{E'V_2}{X} \sin \delta \\ 0 = -kP_d - \frac{V_2^2}{X} + \frac{E'V_2}{X} \cos \delta \\ 0 = P_d - \frac{V_{10}V_2}{X_L} \sin \delta' \\ 0 = -kP_d - \frac{V_2^2}{X_L} + \frac{V_{10}V_2}{X_L} \cos \delta' \end{cases} \quad (13)$$

方程式(13)、式(10)和式(11)组成系统稳态情况下的平衡关系方程, 可以求解和分析系统在正常运行状态下的各个电气量之间的关系。

### 2.2 系统紧急状态分析

频率稳定分析即是分析系统受到大的扰动以后, 系统中发电和用电之间的有功功率是否平衡的

情况分析。电压稳定分析即是系统中无功分布是否平衡的状态分析, 进而保证负荷正常供电电压的要求<sup>[10-11]</sup>。当系统中出现有功扰动, 系统中发电机的机械功率和负荷功率不再平衡, 使得  $P_m \neq P_d$  时, 发电机频率和电压都将发生变化, 根据方程组(9), 可以确定  $\mathbf{x}=[\omega, \delta, E', V_2]^T$  随时间的变化轨迹, 如果发电机的输出功率和负荷功率差额较大, 系统的频率将会迅速下降。

当发电机的无功出力在系统允许范围内时, 满足  $Q_{Gmin} \leq Q_G \leq Q_{Gmax}$ , 所以  $V_1=V_{10}$  恒定, 即发电机母线电压恒定, 这时系统的数学微分方程为

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{1}{H} (P_d - \frac{V_{10}V_2}{X_L} \sin \delta - D_G \Delta \omega) \\ \dot{\delta} = \omega - \frac{1}{D_L} (\frac{V_{10}V_2}{X_L} \sin \delta - P_d) \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{\tau} (-\frac{V_2^2}{X_L} + \frac{V_{10}V_2}{X_L} \cos \delta - kP_d) \\ 0 = Q_G - (-\frac{V_{10}^2}{X_L} + \frac{V_{10}V_2}{X_L} \cos \delta) \end{cases} \quad (14)$$

当发电机的无功存在上下限时, 即系统受到干扰以后, 无功达到  $Q_G=Q_{Gmin,max}$  上下限时, 发电机母线的电压  $V_1$  是变化的, 则系统的微分数学方程变为

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{1}{H} (P_d - \frac{V_1V_2}{X_L} \sin \delta - D_G \Delta \omega) \\ \dot{\delta} = \omega - \frac{1}{D_L} (\frac{V_1V_2}{X_L} \sin \delta - P_d) \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{\tau} (-\frac{V_2^2}{X_L} + \frac{V_1V_2}{X_L} \cos \delta - kP_d) \\ 0 = Q_{Gmin,max} + \frac{V_1^2}{X_L} - \frac{V_1V_2}{X_L} \cos \delta \end{cases} \quad (15)$$

由方程式(14)和式(15)可以确定系统无功是否充足的两种情况下, 系统的变量  $\mathbf{x}=[\omega, \delta, V_1, V_2]^T$  随时间的变化轨迹。

### 3 算例仿真分析

假设该系统中的相关电气参数如下:  $D_G=0.01$ ,  $H=0.1$ ,  $D_L=0.1$ ,  $\tau=0.01$ ,  $K_v=10$ ,  $X_L=0.5$ ,  $X_G=0.5$ ,  $V_{10}=1.0$ ,  $P_{d0}=0.7$ ,  $k=0.25$ ; 系统稳态情况下的起始运行条件为:  $\Delta\omega=0$ ,  $\delta=0.73$ ,  $E'=1.35$ ,  $V_2=0.83$ ,  $V_1=1.02$ ,  $\delta'=0.46$ ; 利用 Matlab 编程求解方程和进行仿真作图分析。

#### 3.1 有功平衡仿真分析

假设系统在  $t=1$  s 时, 系统发电机容量损失

50%, 即系统出现大的有功缺额, 由稳定运行状态进入紧急状态, 需要采取紧急切负荷控制策略对系统进行校正, 在  $t=5$  s 时, 切除相对应的 50% 过负荷量, 当系统不考虑无功的容量限制时, 系统动态特性如图 3 所示。

从图 3 可知, 发电机损失 50% 的容量, 系统出现严重有功缺额, 从稳定运行进入紧急状态, 频率迅速下降, 由于频率下降减少了部分的负荷功率, 负荷母线电压  $V_2$  略微增加, 在第 5 s 实施紧急切负荷控制, 系统中的有功恢复平衡, 频率逐渐地恢复到额定运行状态, 因为切负荷操作时, 负荷的无功被相应的切除了一部分, 无功需求也减少一部分, 母线电压  $V_2$  数值将继续增加, 系统的功角差  $\delta$  继续变小。通过在紧急状态实施紧急切负荷控制, 系统到达一个新的稳定平衡点, 恢复稳定运行。

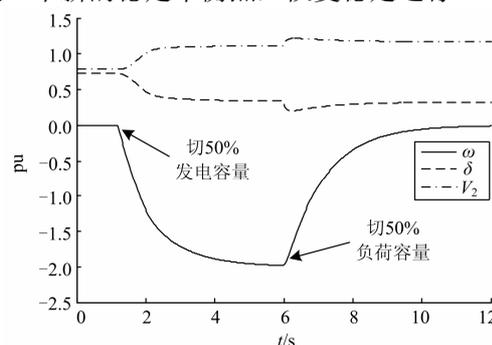


图 3 有功扰动的系统动态曲线图

Fig. 3 Dynamic curve of system active power disturbance

#### 3.2 无功平衡仿真分析

假设系统在  $t=1$  s 时, 系统的无功平衡被破坏, 无功需求从 0.5 pu 增加到 0.6 pu, 系统从稳定运行进入紧急状态, 考虑系统的无功容量 ( $Q=0.5$  pu) 限制时, 系统的动态特性如图 4 所示。当无功消耗在正常范围内, 即保证发电机母线电压  $V_1$  为恒定值, 系统的动态特性如图 5 所示。

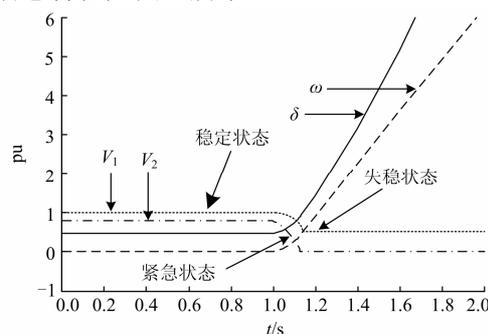


图 4 无功扰动的系统动态曲线(容量限制)

Fig. 4 Dynamic curve of system reactive power disturbance with limited capacity

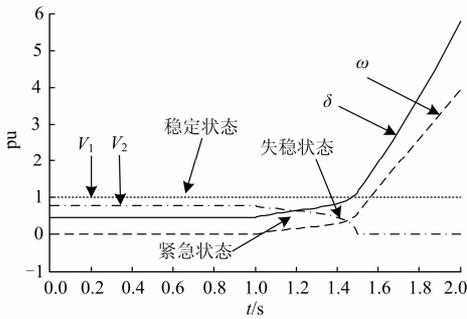


图 5 无功扰动的动态曲线图(容量无限制)

Fig. 5 Dynamic curve of system reactive power disturbance without limited capacity

从图 4 和图 5 看出, 当系统受到严重的干扰, 出现无功不平衡时, 系统从稳定运行状态进入紧急状态, 如果不采取相应的控制措施, 系统将由紧急状态进入失稳状态, 也就是极端紧急状态, 电压迅速下降, 引起受电压影响的负荷有功相应地迅速下降, 接着系统的频率迅速增加, 系统的频率和电压都将失去稳定, 系统崩溃。当存在一定的无功支撑时, 但是补偿量不足, 虽然可以减缓系统电压崩溃的速度, 但是系统仍然由紧急状态进入失稳状态。

### 5 结论

本文研究了电力系统运行状态及其之间的转换关系, 基于单机负荷模型基础上, 重点研究了系统紧急运行状态电气量的变化及其应该采取的控制措施, 得到如下结论:

1) 电力系统受到大的扰动, 判断系统是否将进入紧急运行状态是关键, 此时采取切负荷等控制措施, 阻止系统稳定的进一步破坏, 进而保证系统有功、无功功率的平衡, 恢复系统的稳定性。

2) 由于负荷功率受到系统频率和电压的共同作用, 恢复系统有功平衡的同时, 应该协调考虑无功的平衡分布, 新的切负荷策略应该协调考虑系统频率和电压稳定的恢复, 该结论对改进系统紧急情况下切负荷策略具有重要的现实意义。

### 参考文献

[1] 张健铭, 毕天姝, 刘辉, 等. 孤网运行与频率稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 149-154.  
 ZHANG Jian-ming, BI Tian-shu, LIU Hui, et al. Review of frequency stability for islanded power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 149-154.

[2] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 31-35.  
 SUN Hua-dong, TANG Yong, MA Shi-ying. Analysis for the definition of some basic concepts related to power system[J]. Power System Protection and Control, 2006, 30(17): 31-35.

[3] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 5-10.  
 ZHANG Bao-hui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 5-10.

[4] 李兴源, 李立. 电力系统紧急控制综述[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 5-11, 41.  
 LI Xing-yuan, LI Li. Survey of the emergency control in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 5-11, 41.

[5] 李晓明. 电力系统几个基本概念的分析与探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 130-132.  
 LI Xiao-ming. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 130-132.

[6] 滕夏晨, 王少雄, 张靠社. 电力系统稳定控制方法综述[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(3): 21-25.  
 TENG Xia-chen, WANG Shao-xiong, ZHANG Kao-she. Overview on stability control methods of power system[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(3): 21-25.

[7] 刘少华, 王超, 安军, 等. 计及频率静特性的低频减载方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 140-144.  
 LIU Shao-hua, WANG Chao, AN Jun, et al. Study of under-frequency load shedding scheme based on frequency static characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 140-144.

- [8] KUNDUR P. Power systems stability and control[M]. New York: McGraw Hill, 1994. 18-24.
- [9] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003. LIN Shun-jiang, LIU Ming-bo, ZHOU Xin, et al. Emergency load shedding control optimization for transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 18-24.
- [10] 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 Heng-xu, LI Chang-gang, LIU Yu-tian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [11] 林舜江, 刘明波, 周欣, 等. 暂态电压安全紧急切负荷控制优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 18-24.

---

收稿日期: 2013-08-27; 修回日期: 2013-10-34

作者简介:

张执超(1977-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统紧急控制; E-mail: zzc\_mac@shzu.edu.cn

王增平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化等方面的研究; E-mail: wangzp1103@sina.com

方攀宇(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。