孤岛系统的低频减载方案研究

王 君，王晓茹，谢大鹏，陈义宣

（西南交通大学电气工程学院，四川 成都 610031）

摘要：对某一实际系统形成孤岛后的频率、电压动态和低频减载方案进行了时域仿真研究。研究了低频减载方案的设计，分析了传统的低频减载方案和两种新的半适应与自适应低频减载方案。利用 PSS/E 建立了该实际系统模型及上述各种低频减载模型。仿真研究了有功功率缺额扰动时的频率、电压动态特性和各种减载方案的性能，分析了影响各方案性能的主要因素，提出了改进策略。仿真研究表明该系统成为孤岛后维持频率和电压稳定的能力很低，设计良好的低频减载方案，以及在低频减载方案考虑电压的影响对系统安全稳定运行有重要意义。

关键词：孤岛系统； 低频减载； 频率动态； 电压动态 ； PSS/E

Investigation of under frequency load shedding on an isolated system

WANG Jun，WANG Xiao-ru，XIE Da-peng，CHEN Yi-xuan
(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Simulation in time domain of the frequency and voltage dynamic and the under frequency load shedding(UFLS) scheme on a real isolated power system is carried out in this paper. It researches the design of UFLS, analyzes traditional schemes and two new adaptive schemes, models the system and these schemes using the PSS/E software. The frequency and voltage dynamic, and these UFLS schemes are simulated and the factors that affect them are analyzed. The result indicates that the ability to maintain the frequency and voltage at a standard level is weaker after the system becomes an isolated system, and it has significance for the secure and steady operation to design a perfect UFLS scheme when considering the influence of voltage.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90610026) and the Basic Research Project of Sichuan Province (No. 2006J13-111).

Key words: isolated system；UFLS； frequency dynamic；voltage dynamic； PSS/E

中图分类号： TM762 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)03-0029-05

0 引言

国内外曾多次发生过系统大面积的停电事故，经验表明引发这种灾难性事故的因素复杂多变，系统维持大扰动下频率稳定的能力却在不断下降。当一个受端系统的联络线因故断开形成孤岛后，系统可能有功大量不足，频率下降迅速。低频减载（Under Frequency Load Shedding,UFLS）装置将动作切除部分负荷以抑制频率下降并帮助频率恢复。为此，低频减载装置是保证系统安全稳定运行极端重要的措施，也是防止大面积停电的最后一道防线的重要组成部分[1]。

为了更好地反映功率缺额的大小，低频减载在理论上从最早的按频率离线整定的传统方案[2-3]发展为考虑频率变化率及电压变化率的加速切负荷的半适应方案[4-5]和自适应方案[6]，以及计算机辅助算法[7-8]。实际电网的低频减载方案整定一般为基于单机带集中负荷的方法，它简单易行、计算量小，但不能反映系统的动态过程[9-10]。低频减载方案的性能不仅受功率缺额大小的影响，还与扰动发生地点、系统旋转备用容量及其投入的速度、负荷特性和电压水平等诸多因素密切相关。从维护系统安全稳定运行的角度出发，要求低频减载方案必须能广泛适应不同位置发生的不同数额的功率缺额，因此必须对其校核，评价其适应能力。

本文主要针对某一实际电网，在 PSS/E 上建立其仿真模型，并研究其成为孤岛后在各种功率缺额下的频率及影响频率动态的因素，在该系统上采用了传统的、半适应和自适应减载方案，仿真研究了各方案性能。针对系统所存在的问题提出一些建议，以供对其低频减载方案设计时作参考，设计出符合

基金项目：国家自然科学基金项目（90610026）；四川省应用基础研究项目(2006J13-111)

系统安全适用的低频减载方案。

1　系统简介

所研究实际电力系统通过单回 500 kV 线路与外界相连，当 500 kV 线路因故断开该系统将形成孤岛。孤岛系统内部自带有 3 个火电厂，在枯大方式下，系统内所有机组满发，总装机容量为 650 MW，电厂 A 有 2 台 50 MW 和 2 台 150 MW 的机组，电厂 B 有 2 台 100 MW 的机组，电厂 C 仅有 1 台 50 MW 的发电机。系统负荷约为 720 MW，由 60%恒阻抗和 40%感应电动机负荷组成。系统简图如图 1 所示。

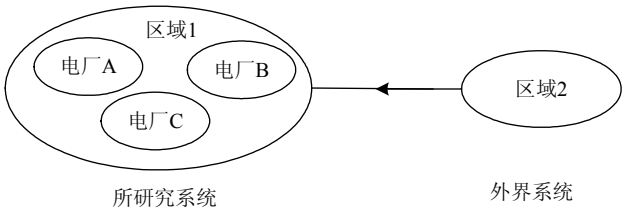

图 1 仿真系统的简图

Fig.1 Simple frame of simulation system

该系统原数据为 PSASP 格式，发电机采用 5 阶模型，发电机的控制系统采用 1 型调速器和 1 型励磁器模型。将数据移植到 PSS/E 上后，发电机采用 GENSAL 模型，感应电动机负荷采用 CIM5BL 模型。由于 PSS/E 模型库中没有对应的调速器和励磁系统模型，利用 PSS/E 用户自定义模型功能，使用 FORTRAN 语言建立了其调速器和励磁系统数学模型。

2　频率动态

系统频率动态在时间和空间上具有分布性，影响频率动态的因素也有很多，如系统模型和参数的选取、系统备用容量、扰动地点及其大小等[10]。充分了解所研究系统的动态响应为整定合理的低频减载方案尤为重要。

对所建立的系统，在 1 s 时断开联络线后增加 30 MW 的负荷有功，总有功缺额为 100 MW，其频率动态结果表明：扰动初始阶段频率下降最快，如图 2 所示；同一扰动下不同地点的频率动态不一样，如图 2（a）所示；在不同地点发生相同大小的扰动时某点的频率响应也会有一定的差别，离扰动地点近的频率下降更快，如图 2 (b)所示。

在 1 s 时联络线断开形成孤岛后，在 2 s 时因发电机跳闸导致系统有功缺额分别为 70 MW、120 MW、170 MW 的三种扰动下，系统的频率和电压动态如图 3 所示。结果表明联络线断开后，若孤岛系统内部分发电机跳闸，系统维持频率和电压稳定的能力下降。

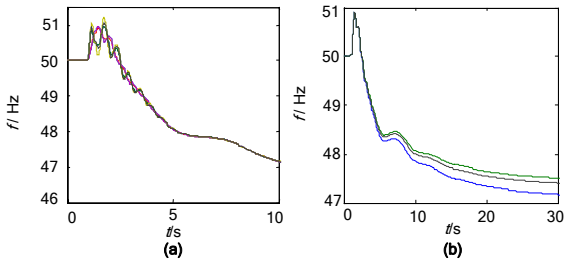

图 2 频率动态响应

Fig.2 Dynamic response of frequency

此外，图 3（a）还表明有功缺额越大频率下降越快，最终频率也越低；由图 3（b）可知在扰动后电压下降很明显且维持低压时间较长，有功缺额较大时电压再次出现一个低压过程，虽然幅度不如前一次大但经历时间更长。

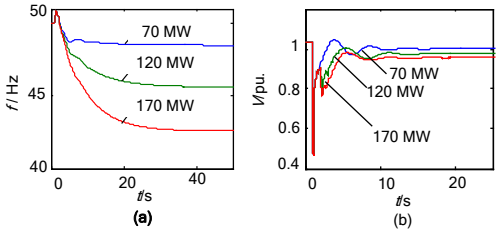

图 3 各种有功缺额时系统惯性中心频率和机端电压

Fig.3 System inertia center frequency and terminal voltage under different power deficiency

3　UFLS 方案的设计

3.1 常见的低频减载方案

传统的低频减载方案已发展得比较成熟，它离线整定装置轮数、每轮起动频率值、人为附加延时、每轮所切负荷量等，当装置测量的本地频率下降到起动频率时发出切负荷操作的命令。

传统方案包括频率级差相等且切负荷总量平均分配的线性方案和非线性方案[11]。非线性方案若以快速抑制频率下降为出发点，可采用迭代算法计算各级工作频率；而若以恢复频率为目的，则希望第 i 级动作后频率恢复至给定的恢复频率 f_{hf}，由此计算各级切除的负荷量 $P_{\mathrm{LS}i}$ [11]。

$$P_{\mathrm{LS}i}=\frac{k_{\mathrm{D}}(f_{\mathrm{hf}}-f_i)}{f_0-k_{\mathrm{D}}(f_0-f_{\mathrm{hf}})}\left(1-\sum_{j=1}^{i-1}P_{\mathrm{LS}j}\right)\qquad(1)$$

其中：f_0 为正常运行时的系统频率；f_{hf} 可取 49.5 Hz，为简化计算，常取 50 Hz。显然，该方案的设计结果与调节效应系数 k_{D} 和级数 n 有关，本文 k_{D} 取 2，n

取 7。

图 4 所示为系统在 1 s 时发生三相短路，1.1 s 断开故障线路，2 s 时一台 50 MW 机组连锁跳闸，系统的有功缺额为 120 MW 时，采用三种不同的传统低频减载方案作用下系统的频率动态。

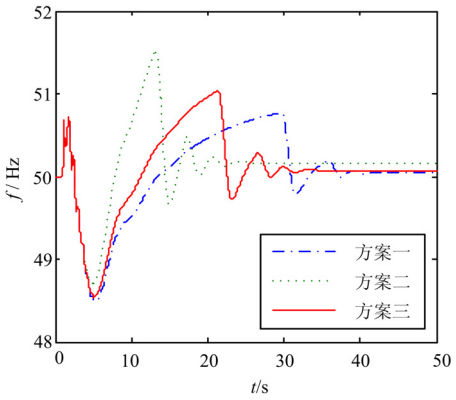

图 4 三种传统的低频减载方案作用下的频率动态

Fig.4 Frequency under three traditional UFLS schemes

实验结果表明，级数越少切负荷量越多，过切越严重，但抑制频率下降的速度越快；级数相同时，方案三比方案一过切更严重(如表 1 所示)。

表 1 三种传统低频减载方案的比较

Tab.1 Comparison of three traditional UFLS schemes

轮次	动作频率/Hz	切负荷总量的百分数		
		方案一	方案二	方案三
1	49.2	5%	7%	3.2%
2	49.0	5%	7%	3.87%
3	48.8	5%	7%	4.46%
4	48.6	5%	7%	4.95%
5	48.4	5%	7%	5.35%
6	48.2	5%	——	5.63%
7	48.0	5%	——	5.8%
实际切除负荷总量/MW		129.6	158.9	136.7

目前的低频减载方案中常带有长延时的恢复级，以有效抑制频率悬浮于 49.5 Hz 以下。恢复级可为一轮或多轮，延时可设置为 10 s 或 15 s，由图 5 可见恢复级不同延时下只是中间过程稍有不同，但最终恢复频率一致。恢复级切负荷量应小于等于基本级相同动作频率时的切负荷量。

上述传统的低频减载方案在不同扰动情况下均采用相同的减载方案，但对于具体的运行情况，预定的 UFLS 不一定是最优方案，不具有快速性和适应性，容易造成过切、欠切或者无选择的切除负荷。

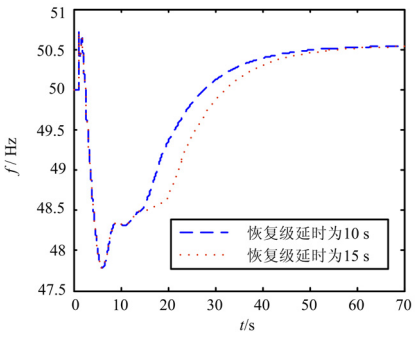

图 5 恢复级延时不同时系统的频率动态

Fig.5 System frequency with different relay time at resume stage

3.2 半适应的方案

半适应法是在传统法上的一种改进算法。半适应法即当频率下降到预先设置的整定值时就测量频率下降率，再依据此频率下降率决定首轮应该切除的负荷量，而其他各轮与传统法一致。这种方法的优点在于当系统出现严重功率缺额时加速切除负荷，以利于抑制频率的过分降低，从而实现了加速切负荷的目的。图6为某一半适应低频减载方案的结构图。

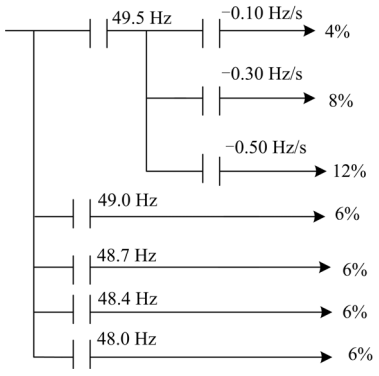

图 6 半适应低频减载方案的结构图

Fig.6 Frame of semi-adaptive UFLS scheme

理论上半适应法能有效抑制频率下降速度，但所切除负荷总量依然是离线整定的，与实际缺额存在差异；而且，为了躲过频率的偶然波动以反映整个系统的平均频率而设置的人为延时降低了其快速动作的性能；频率变化率的整定值也一般依据运行经验获得，不够准确；另外，当首轮切除负荷后系统又出现其他重大事故导致功率缺额变大时，这种减载方案并不能有效防止系统频率崩溃。

3.3 自适应方案

自适应方案能够根据所获得的频率和频率变化率信息调整低频减载的主要参数，如频率定值或切

负荷量。本文所采用的自适应方案是基于简化单机等值模型[12]的频率动态响应提出的，该方案能根据频率变化率预测功率缺额的大小[5,9]。

对于简单的单机系统模型，考虑系统调速器的作用，如图 7 所示，则系统频率响应为：

$$\Delta\omega=\left(\frac{R\omega_{\mathrm{n}}^2}{DR+K_{\mathrm{m}}}\right)\left(\frac{(1+T_{\mathrm{R}}s)P_{\mathrm{d}}}{s^2+2\varsigma\omega_{\mathrm{n}}s+\omega_{\mathrm{n}}^2}\right) \tag{2}$$

其中：$\omega_{\mathrm{n}}^2=\dfrac{DR+K_{\mathrm{m}}}{2HRT_{\mathrm{R}}}$；$\varsigma=\left[\dfrac{2HR+(DR+K_{\mathrm{m}}F_{\mathrm{H}})T_{\mathrm{R}}}{2(DR+K_{\mathrm{m}})}\right]\omega_{\mathrm{n}}$

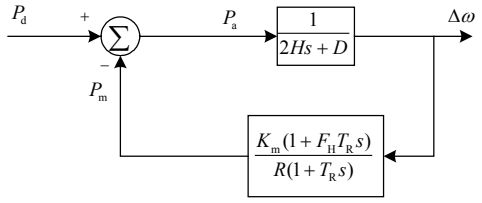

图 7 考虑调速器的单机系统传递函数框图

Fig.7 Transfer function of a single machine system with governor

设 P_{d} 的阶跃函数为 P_{step}，则

$$\Delta\omega(t)=\frac{RP_{\mathrm{step}}}{DR+K_{\mathrm{m}}}[1+\alpha\mathrm{e}^{-\varsigma\omega_{\mathrm{n}}t}\sin(\omega_{\mathrm{r}}t+\Phi)] \tag{3}$$

其中：$\alpha=\sqrt{\dfrac{1-2T_{\mathrm{R}}\varsigma\omega_{\mathrm{n}}+T_{\mathrm{R}}^2\omega_{\mathrm{n}}^2}{1-\varsigma^2}}$；$\omega_{\mathrm{r}}=\omega_{\mathrm{n}}\sqrt{1-\varsigma^2}$

$$\Phi=\Phi_1-\Phi_2=\tan^{-1}\left(\frac{\omega_{\mathrm{r}}T_{\mathrm{R}}}{1-\varsigma\omega_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{R}}}\right)-\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\varsigma^2}}{-\varsigma}\right)$$

频率变化率为：

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{\alpha\omega_{\mathrm{n}}RP_{\mathrm{step}}}{DR+K_{\mathrm{m}}}\mathrm{e}^{-\varsigma\omega_{\mathrm{n}}t}\sin(\omega_{\mathrm{r}}t+\Phi_1) \tag{4}$$

当 t=0 时，$\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\alpha\omega_{\mathrm{n}}RP_{\mathrm{step}}}{DR+K_{\mathrm{m}}}\sin(\Phi_1)=\dfrac{\omega_{\mathrm{n}}^2RP_{\mathrm{step}}T_{\mathrm{R}}}{DR+K_{\mathrm{m}}}$ (5)

即，$\left.\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0}=\dfrac{P_{\mathrm{step}}}{2H}$ (6)

对于一个有 N 台发电机的系统，有：

$$2\sum_{i=1}^{N}H_i\dot{\omega}_i=\sum_{i=1}^{N}(P_{\mathrm{m}i}-P_{\mathrm{e}i}) \tag{7}$$

$$\dot{\omega}_{\mathrm{system}}=\sum_{i=1}^{N}(H_i\dot{\omega}_i)/\sum_{i=1}^{N}H_i \tag{8}$$

其中：$H_{\mathrm{system}}=\sum_{i=1}^{N}H_i(S_{\mathrm{B}i}/S_{\mathrm{Bsystem}})$；$S_{\mathrm{B}i}$ 为每台发电机的容量；S_{Bsystem} 为系统的基准容量。

因此，系统的有功缺额为：

$$P_{\mathrm{step}}=2H_{\mathrm{system}}\dot{\omega}_{\mathrm{system}}|_{t=0} \tag{9}$$

切负荷量为：$P_{\mathrm{shed}}=P_{\mathrm{step}}-P_{\mathrm{max\,允许}}$ (10)

其中：$P_{\mathrm{max\,允许}}=\dfrac{(DR+K_{\mathrm{m}})\Delta\omega}{R[1+\alpha\mathrm{e}^{-\varsigma\omega_{\mathrm{n}}t_{\mathrm{x}}}\sin(\omega_{\mathrm{r}}t_{\mathrm{x}}+\Phi)]}$

$$t_{\mathrm{x}}=\frac{n\pi-\Phi_1}{\omega_{\mathrm{r}}}=\frac{1}{\omega_{\mathrm{r}}}\tan^{-1}\left(\frac{\omega_{\mathrm{r}}T_{\mathrm{R}}}{\varsigma\omega_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{R}}-1}\right)$$

图 8 为某一自适应低频减载方案的结构图，其中各轮所切负荷不考虑负荷顺位的因素。

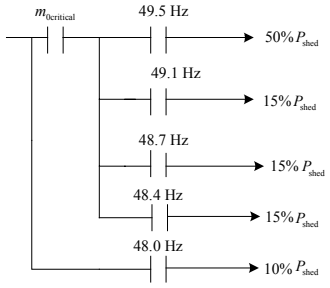

图 8 自适应低频减载方案的结构图

Fig.8 Frame of self-adaptive UFLS scheme

4　动态仿真

4.1 三相短路且一台 50 MW 机组跳闸

当系统在 1 s 发生联络线三相短路故障，1.1 s 切除故障并在 2 s 时某台 50 MW 机组连锁跳闸时，系统有功缺额约为 120 MW，在此状态下无低频减载装置、投入带恢复级的低频减载装置、半适应法和自适应法的低频减载装置时，系统的频率动态如图 9 所示。

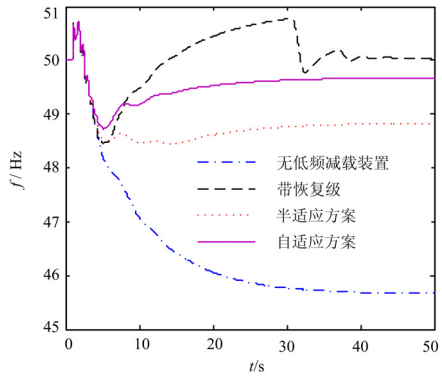

图 9 120 MW 时系统的频率动态

Fig.9 System frequency dynamic with 120 MW deficiency

4.2 三相短路且一台 100 MW 机组跳闸

当系统在 1 s 发生联络线三相短路故障，1.1 s 切除故障并在 2 s 时某台 100 MW 机组连锁跳闸时，系统有功缺额约为 170 MW，在此状态下无低频减

载装置、投入带恢复级的低频减载装置、半适应法和自适应法的低频减载装置时，系统的频率动态如图 10 所示。

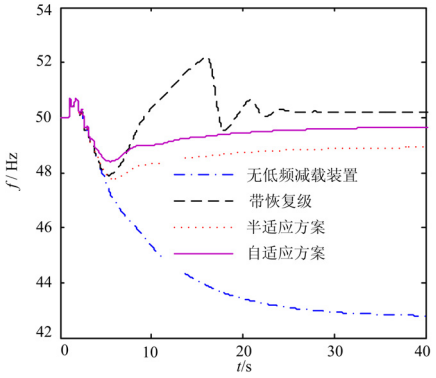

图 10 170 MW 时系统的频率动态

Fig.10 System frequency dynamic with 170 MW deficiency

4.3 分析

图 9 和图 10 表明系统存在有功功率缺额时，系统本身维持频率稳定的能力很弱；投入低频减载装置后有助于频率的恢复。在两种故障下，自适应低频减载方案均能有效地恢复到工频左右，其频率的最低点均高于其他方案，切负荷量最为准确。虽然半适应方案也加快了切除负荷的速度，但切负荷量不足。传统的低频减载方案存在超调，由于不能根据实时信息而动作，其适应性差。

在该系统中，低频减载动作后所出现的超调可能由于系统调速器的影响和负荷的电压特性所造成。由于调速器响应时间较长，在低频减载动作后才发挥作用因而造成过切。另一方面，负荷中恒阻抗比例较大，其有功与电压的平方成正比。当电压下降时，剩余负荷消耗有功也下降，特别是联络线三相短路的初始阶段，电压瞬间下降剧烈，而导致频率上升。随着励磁器的动作，电压开始回升，频率逐渐下降，触发低频减载装置动作；但切除有功和无功负荷造成电压上升，进一步造成有功缺额的增加，从而低频减载装置继续动作，造成过切。

可以采取以下几点措施减小电压对频率的影响：

（1）优先切除恒阻抗负荷及发电厂附近的负荷。

（2）加强电网建设，在无功不足点可以增加无功补偿装置，合理地投切并联电容[13]等措施支撑无功，调解电压。

（3）采取低压减载措施，并与低频减载相配合。

此外，随着经济的发展该系统用电负荷将迅速增长，系统将需要从供端获得更大容量的有功，成为孤岛系统后，其功率缺额将更大，若同时失去大容量机组，系统可能暂态不稳定，在此情况下应考虑与联切负荷共同协调动作，以防止系统崩溃。

5 结论

（1）受端系统成为孤岛后系统维持频率稳定和电压稳定的能力下降，电压的变化对 UFLS 装置的影响主要通过负荷有功的电压特性而产生，导致低频减载制止频率下降并恢复频率的能力降低，因此，负荷的电压特性对方案的影响很大，应采取措施减小这一影响，低频减载方案的设计有必要考虑电压的影响。

（2）与传统方案和半适应方案相比，自适应低频减载方案具有更快和切负荷量更准的优势，面对不同的扰动其适应性更强。但将自适应方案应用到实际工程中，还需依赖广域量测的信息。

（3）半适应方案能快速动作有效抑制频率的降低，但频率变化率如何整定却难以解决，这种以故障发生后的某一个时刻系统频率的变化率确定该轮的切负荷量不够精确。

参考文献

[1] 袁季修．防止电力系统频率崩溃的紧急控制[J].电力自动化设备，2002，22(4)：1-4.
YUAN Ji-xiu. Emergency Control for Preventing Frequency Collapse of Power System[J]. Electrical Power Automation Equipment, 2002, 22(4)：1-4.

[2] Lokay H E, Burtnyk V. Application of Underfrequency Relays for Automatic Load Shedding[J].IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1968, 87(3): 776-783.

[3] 陈俊山，洪兰秀，郑志远．电力系统低频减载研究与应用发展[J]．继电器，2007，35(14)：79-82.
CHEN Jun-shan, HONG Lan-xiu, ZHENG Zhi-yuan. Investigation and Application of under-frequency Loading Shedding[J]. Relay, 2007，35(14)：79-82.

[4] ZHANG Li, ZHONG Jin. UFLS Design by Using f and Integrating df/dt[A]. in: PSCE[C]. 2006. 1840-1844.

[5] 孙光辉．新原理的电力系统频率电压紧急控制装置的研究[J]．电网技术，1995，19(11): 21-25.
SUN Guang-hui. A New Emergency Frequency and Voltage Control Relay[J]. Power System Technology, 1995, 19(11): 21-25.

[6] Anderson P M，Mirheydar M．An Adaptive Method for Setting Under Frequency Load Shedding Relays[J]. IEEE Trans on Power Systems，1992, 7(2): 647-655.

[7] Hsu C T, Kang M S, Chen C S.Design of Adaptive Load Shedding by Artificial Neural Networks[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 2005,152(3).

（下转第 52 页　continued on page 52）

[5] 程莹，刘明波．含离散控制变量的大规模电力系统无功优化[J]．中国电机工程学报，2002，22(5)：54-60．
CHENG Ying, LIU Ming-bo. Reactive-Power Optimization of Large-scale Power Systems with Discrete Control Variables[J]. Proceedings of the CSEE，2002，22(5)：54-60.

[6] 韦化，李滨，杭乃善，等．大规模水-火电力系统最优潮流的现代内点算法实现[J]．中国电机工程学报，2003，23(6)：13-18．
WEI Hua, LI Bin, HANG Nai-shan, et al. An Implementation of Interior Point Algorithm for Large-scale Hydro-thermal Optimal Power Flow Problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003，23(6)：13-18.

[7] LIU Ming-bo，Tao S K．An Extended Nonlinear Primal-dual Interior Point Algorithm for Reactive Power Optimization of Large-scale Power Systems with Discrete Control Variables[J]．IEEE Trans on Power Systems，2002，17(4)：982-991.

[8] Kennedy J，Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. in: IEEE International Conference on Neural Network[C]. Perth(Australia): 1995.

[9] Maurice Clerc．Discrete Particle Swarm Optimization [EB/OL]. http：//www.Mauriceclerc.net. 2001.

[10] 胡家声，郭创新,等．离散粒子群优化算法在输电网络扩展规划中的应用[J]．电力系统自动化, 2004，28(20)：31-37.
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, et al. Application of Discrete Particle Swarm Optimization Network Expansion Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004，28(20)：31-37.

收稿日期：2008-08-10； 修回日期：2009-10-08

作者简介：

姚 煜(1985-)，男，工学硕士，从事电力系统运行生产工作; E-mail: maths0@yahoo.com.cn

蔡燕春(1984-)，男，工学硕士，从事电力系统运行生产工作。

（上接第 33 页 continued from page 33）

[8] Mitchell M A, Pecas Lopes J A, Fidalgo J N, et al. Using a Neural Network to Predict the Dynamic Frequency Response of a Power System to an Under-frequency Load Shedding Scenario[A]. in: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2000.

[9] 韩英铎，闵勇，洪绍斌. 复杂扩展式电力系统低频减载方案设计[J]. 电力系统自动化，1992，16（1）：34-39.
HAN Ying-duo, MIN Yong, HONG Shao-bin．The Design of Under Frequency Load Shedding Scheme in Large Scale Multi-machine Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1992，16（1）：34-39.

[10] 闵勇. 复杂扩展式电力系统中功率-频率动态过程的分析及低频减载装置整定[D]. 北京：清华大学，1990.
MIN Yong. Analysis of Power-Frequency Dynamics and Designation of Underfrequency Load Shedding Scheme in Large Scale Multi-machine Power Systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.

[11] 东北电力管理局调度局. 电力系统运行操作与计算[M]. 北京：水利电力出版社，1977.

[12] Anderson P M，Mirheydar M. A Low-Order System Frequency Response Model[J]. IEEE Trans on Power Systems，1990，5(3): 720-729.

[13] 时伯年，黄志刚，韩英铎. 并联电容投切对孤立系统低频减载设计的影响[J]. 电力系统自动化，2002，26（17）：41-44.
SHI Bo-nian, HUANG Zhi-gang, HAN Ying-duo. Effect of Shunt Capacitor Switching on UFLS Designing for Isolated System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26（17）：41-44.

收稿日期：2009-03-06； 修回日期：2009-05-30

作者简介：

王 君(1983-)，女，硕士研究生，从事电力系统频率稳定控制方面的研究；E-mail: wangjun0863@163.com

王晓茹(1962-)，女，教授，博士生导师，主要从事电力系统保护与安全稳定控制，变电站自动化技术方面的研究；

谢大鹏(1980-)，男，硕士研究生，从事电力系统频率稳定控制方面的研究。