

## 计及频率差变化率的低频减载方案的研究

常喜强<sup>1,2</sup>, 何恒靖<sup>1</sup>, 解大<sup>1</sup>, 姚秀萍<sup>2</sup>, 艾芊<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 通过分析计及调速器的发电机经典模型, 推导出频率差变化率与系统有功功率缺额之间的定量关系。简要介绍了基于上述关系的自适应和半适应低频减载方案。设计了基于实时频率差变化率的切负荷自适应方案, 并通过在不同负荷缺额下进行切负荷仿真来比较和分析自适应方案与半适应、传统方案的切负荷性能差异。总结出了在不同功率缺额下三种方案的切负荷特性。为更深入研究计及频率差变化率的低频减载效果, 单独对不同的自适应方案进行了仿真分析。给出了计及频率偏差变化率的自适应方案在低频减载中的优势, 由此得出低频减载方案设计整定中应遵循的规律。

**关键词:** ROCOF; 低频减载; 自适应方案; 半适应方案; 电力系统

### Study on under frequency load shedding schemes concerning ROCOF

CHANG Xi-qiang<sup>1, 2</sup>, HE Heng-jing<sup>1</sup>, XIE Da<sup>1</sup>, YAO Xiu-ping<sup>2</sup>, AI Qian<sup>2</sup>

(1. Electrical Engineering Department, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China;

2. Xinjiang Electrical Power Company, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** By analyzing classical generator model with governor, the equation of rate of change of frequency(ROCOF) and the load shortage under turbine model is deduced. Adaptive and semi-adaptive under frequency load shedding(UFLS) scenario based on the relationship above are briefly introduced. Adaptive schemes based on real time ROCOF calculation are designed. Computer simulation is used to compare the behavior of the adaptive schemes when selecting different percentages of load to be disconnected with the traditional and semi-adaptive schemes. Characteristics of each kind of scenario are summarized. To investigate the UFLS behavior of schemes concerning ROCOF in detail, scenarios designed by adaptive method are examined separately. In the end, advantages of adaptive schemes concerning ROCOF are given and rules which should be followed in designing schemes are deduced.

**Key words:** ROCOF; UFLS; adaptive scheme; semi-adaptive scheme; power system

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0068-06

## 0 引言

国内外电网运行经验表明: 在电网内装设低频减负荷装置是防止系统崩溃、避免长时间大面积停电的基本措施<sup>[1]</sup>。低频减载方案的设计需要考虑负荷频率特性<sup>[2]</sup>、系统模型及相关动态变量之间的关系<sup>[3]</sup>等重要因素。好的低频减载方案对维持系统安全、稳定和经济运行起着至关重要的作用。目前低频减载方案主要有三类, 即传统方案、自适应方案和半适应方案<sup>[4]</sup>。

传统的低频切负荷装置整定的方案往往是依据系统运行经验和事故统计, 决定出最大功率缺额, 由系统各大机组运行危险点决定最小频率。根据经验决定切负荷装置动作级差, 多数是等差排列<sup>[5]</sup>。这种整定切负荷方案的方法没有考虑到发电机的调速特性,

也没有考虑到由于事故功率缺额与整定方案不同对切负荷效果所造成的影响, 所以不具有针对性, 往往容易过切或切负荷量不足, 与发电机调速特性缺乏配合还可能会导致严重超调, 这在电力市场下, 会造成巨大的经济损失, 也给广大电力用户带来不便。而自适应及半适应方案将频率差变化率作为切负荷方案设计的依据之一, 通过频率差变化率与系统功率缺额之间的关系来整定系统切负荷量, 从而使得切负荷方案更加合理, 系统切负荷频率特性及运行经济性得到提高。

本文采用计及调速器的经典模型, 推导出汽轮机模型下, 频率差变化率与系统功率缺额的定量关系, 设计了基于实时频率差变化率的切负荷自适应方案, 并与传统方案和半适应方案分别比较, 分析了自适应方案的优越性。最后, 将不同自适应方案

之间做了对比, 总结出设计整定中应遵循的规律。

## 1 计及调速器的发电机经典模型

摇摆方程决定了电机转子的运动, 并建立了惯性转矩与在转子上机械转矩和电磁转矩合成量的关系式, 如式(1)所示<sup>[6]</sup>:

$$J\ddot{\theta} = T_a \quad (1)$$

式中:  $J$  为加在旋转轴上所有转动部分的转动惯量;  $\dot{\theta}$  为对应一个固定参考轴线的转轴的机械角速度;  $T_a$  是作用于转轴上的加速转矩。

由于功率  $P$  与转矩  $T$  存在如式(2)关系:

$$P = \omega_r T \quad (2)$$

结合摇摆方程, 可以推导出功率偏差与转轴角速度的关系, 可建立如图1的传递函数<sup>[7]</sup>:

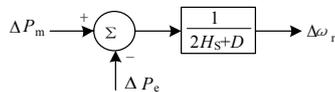


图1 功率与转速的传递函数

Fig.1 Transfer function relating speed and power

其中:  $H$  为系统惯性常数;  $D$  为发电机负荷阻尼常数;  $H$  与  $D$  的大小取决于发电机特性与结构。

计及发电机调速器, 以某再热汽轮机为例, 可以得到分析系统频率响应的发电机经典模型(图2)。

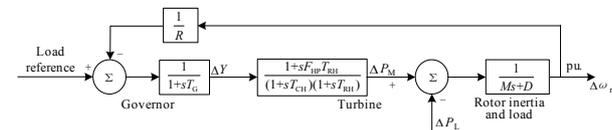


图2 计及调速器的发电机经典模型

Fig.2 Block diagram of a generating unit with governor

图2中, 各参数均为标么值,  $M = 2H$ 。由于标么值下  $f = \omega$ , 所以  $\Delta f = \Delta\omega$ 。通过分析  $\Delta\omega$  的变化来分析  $\Delta f$  的变化。 $\omega_0$  为同步角速度,  $\Delta\omega_r$  为当前转速的偏离值, 也等于当前系统频率与稳态频率(50 Hz)的差值。当  $\Delta\omega_r$  为正时, 系统频率高于稳态频率值,  $\Delta\omega_r$  为负时, 系统频率低于稳态频率值。 $R$  为发电机组的调差系数<sup>[7]</sup>,  $R$  的值决定了发电机稳态转速-负荷特性。可以用转速偏差  $\Delta\omega_r$  (或频率偏差  $\Delta f$ ) 与阀门位置 ( $\Delta Y$ ) 的比值来计算。 $R$  的大小取决于发电机调速系统。

图2中 Load reference (即  $\Delta P_{LR}$ ) 为发电机额定带负荷指标, 在系统发生失机或联络线跳闸等大型事故引起频率变化时, 由于事故发生后频率下降较

快, 所以一般保持不变, 可以认为等于零。 $\Delta P_L$  为发电机端负荷相对于稳态值的功率变化, 事故时, 认为等于功率缺额。 $\Delta Y$  为调速器在机端频率差值闭环反馈下对汽轮机的调整。 $\Delta P_m$  为发电机输出在事故时的变化, 当  $\Delta P_m = \Delta P_L$  时, 说明发电机输出变化等于机端负荷变化, 即发电机输入输出平衡, 频率即达到稳定值。图中各参数取值可参见文献[7]。

当系统发生事故, 导致发电机输入与输出不平衡, 引起频率下降或上升。闭环的负反馈引导调速器动作, 调节汽轮机汽门, 从而调节发电机出力, 最终达到平衡。但是由于事故发生后, 系统频率快速变化, 发电机的调速系统来不及完全动作, 为了防止频率崩溃, 就要投入切负荷装置, 通过投切适量负荷, 减小  $\Delta P_L$  的值, 加速达到平衡。

## 2 ROCOF 与系统功率缺额的关系

ROCOF (rate of change of frequency), 即系统频率差变化率<sup>[8]</sup>, 表征了系统发生事故的严重性, 通过 ROCOF 的计算, 可以较为准确地估计系统功率缺额。

从图2可以得到系统频率变化表达式(3):

$$\left(\Delta P_{LR} - \frac{1}{R}\Delta f\right) \frac{1}{1+sT_G} \times \frac{1+sF_{HP}T_{RH}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} = (Ms+D)\Delta f + \Delta P_L \quad (3)$$

由于实际系统中, Load reference 一般保持不变, 即  $\Delta P_{LR} = 0$ , 系统功率缺额在两次变化之间保持常数, 即为阶跃函数, 拉氏变换后为:  $\Delta P_L / s$ 。所以式(3)可以化简为式(4):

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_L}{s(Ms+D + \frac{N}{R})} \quad (4)$$

$$\text{式中: } N = \frac{1}{1+sT_G} \times \frac{1+sF_{HP}T_{RH}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})}$$

考虑时间  $t \rightarrow 0$  时, 即  $s \rightarrow \infty$ , 可以近似地认为  $N = 0$ , 式(4)可以化简为式(5):

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_L}{s(Ms+D)} \quad (5)$$

拉氏反变换式(5)得到时域表达式(6):

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{D} \left(1 - e^{-\frac{D}{2H}t}\right) \quad (6)$$

对式(6)求导, 即得到 ROCOF 式(7):

$$\frac{d\Delta f}{dt} = -\frac{\Delta P_L}{2H} e^{-\frac{D}{2H}t} \quad (7)$$

考虑  $t \rightarrow 0$  时的值得得:

$$\left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{\Delta P_L}{2H} \quad (8)$$

根据式 (8), 若测知  $t = 0$  时刻系统的 ROCOF, 就可以算出此时系统的功率缺额。基于这一理论, 发展了半适应 (semi-adaptive) 和自适应 (adaptive) 的低频切负荷方法。

### 3 与传统方案和半适应方案的比较

根据文献[1], 半适应的方法是: 通过测定系统  $t = 0$  的 ROCOF, 用式 (8) 计算得出当前系统功率缺额 (即发电机调速器为动作时, 系统的功率缺额), 调节继电器, 在一定的时间或频率下, 一次性切除较大百分比的总功率缺额, 接下来就按照传统方案的方法整定继电器按照频率绝对值切除预先整定的功率值。自适应方法与半适应方法的不同在于, 计算出  $t = 0$  时刻系统功率缺额以后, 整定继电器在不同的频率点处, 按照功率缺额的百分比来切负荷。可以看出, 自适应切负荷的方法最有针对性, 而且避免了由于选择切负荷总量的不同造成的不利影响。以下将讨论上述三种方法, 表 1 为上述方法的整定方案。文中所用到的最低频率、下降时间、恢复时间、稳态频率<sup>[9]</sup>等定义见附录。

表 1 三种不同的低频减负荷方案

Tab.1 Three different under frequency load shedding schemes

$f/\text{Hz}$	自适应方案 (scheme1)	半适应方案 (scheme2)	传统方案 (scheme3)
49.4	50%	50%	0.08
49.0	20%	0.06	0.06
48.6	10%	0.06	0.06

#### 3.1 功率缺额为 0.15 时 (图 3)

由图 3 可以看出, 三种方案都只动作了一步。其中传统方案切负荷 0.08 大于半适应和自适应的方案 (50%  $\Delta P$ ), 但与调速器缺乏配合, 造成超调, 虽然稳态频率接近 50 Hz, 但显然是不理想的。半适应和自适应切负荷量低于传统方案, 所以与调速器配合良好, 未造成超调, 但由于第一步的动作值相同, 所以曲线重合。另外这两种方案稳态频率大于 49.5 Hz, 满足电力系统安全运行的要求。

#### 3.2 功率缺额为 0.25 时 (图 4)

功率缺额为 0.25 时, 三种方案都是动作了一步。传统方案切负荷量仍为 0.08, 低于半适应和自适应方案的 50%  $\Delta P$ , 所以最小频率低于这两种方案, 另外, 由于和调速器缺乏配合, 出现超调。半适应和自适应的方案由于切除同样负荷量, 曲线重合, 稳态频率同样满足系统要求。

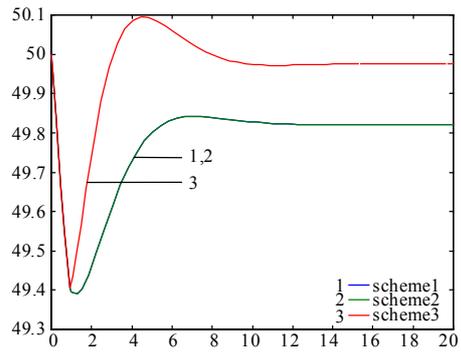


图 3 功率缺额为 0.15 时的频率响应

Fig.3 Frequency response when  $\Delta P = 0.15$

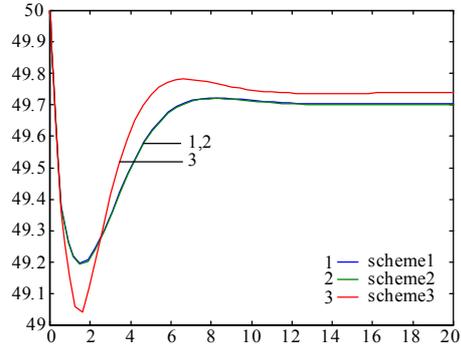


图 4 功率缺额为 0.25 时的频率响应

Fig.4 Frequency response when  $\Delta P = 0.25$

#### 3.3 功率缺额为 0.35 时 (图 5)

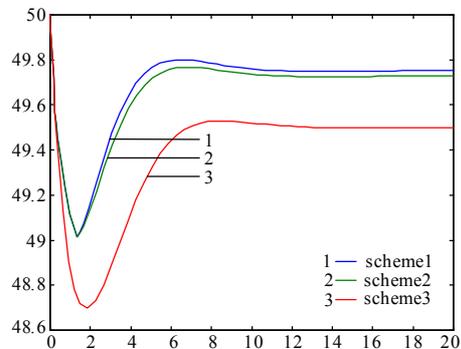


图 5 功率缺额为 0.35 时的频率响应

Fig.5 Frequency response when  $\Delta P = 0.35$

从图 5 看出, 传统方案动作了三步, 共切负荷 0.2, 最小频率低于另外两种方案。半适应方案共切负荷约 0.235, 自适应方案切负荷约 0.245, 可见自适应方案切负荷量略大于半适应方案, 其恢复时间和稳态频率指标也好于半适应方案。

#### 3.4 功率缺额为 0.45 时 (图 6)

功率缺额为 0.45 时, 曲线与功率缺额为 0.35 时相似。但由于此时自适应方案切负荷量 0.315, 大于半适应方案 0.235, 所以曲线高于半适应方案, 调整时间和稳态频率均明显优于半适应方案。

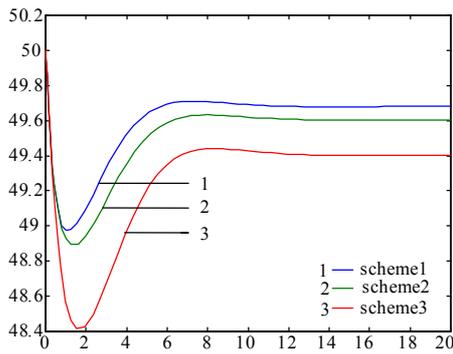


图6 功率缺额 0.45 时的频率响应

Fig.6 Frequency response when  $\Delta P = 0.45$ 

### 3.5 分析比较

传统方案中当功率缺额较小时,其首轮切负荷量决定了其低频减载的效果,如图3、4;当功率缺额较大时,其总的切负荷量决定了减载的效果,如图6;当方案实际切负荷量与功率缺额接近时由于调速器的作用容易产生频率的超调,如图3。半适应方案记及了频率差变化率,通过计算初始时刻功率缺额来确定首轮切负荷量,因此功率缺额较小时切负荷效果较好,如图5;当功率缺额较大时切负荷特性与传统方案类似。自适应方案完全按照计算的初始时刻功率缺额来整定各轮切负荷量,其切负荷效果受功率缺额变化的影响较小,因此在各种事故下均具有良好的低频减载特性。

## 4 不同自适应方案的比较

以下讨论不同的自适应方案在低频减载中的作用,表2为几种自适应的整定方案。

表2 三种不同的自适应方案

Tab.2 Three different adaptive schemes

方案1	方案2	方案3
49.4 (50%)	49.4 (33.3%)	49.6 (33.3%)
49.0 (10%)	49.0 (20%)	49.2 (20%)
48.8 (5%)	48.8 (10%)	49.0 (10%)

由表2可以看出,方案1与方案2的动作频率相同,不同在于每一频率对应的切负荷百分比不同;方案2与方案3的切负荷百分比相同,但是动作频率值不同,下图为不同功率缺额时,以上三种方案作用下,系统的频率响应。

#### 4.1 功率缺额为 0.15 (图7)

从图7中可以看出,三种方案都只动作了一步。方案1和方案2在频率降到49.4 Hz之前曲线重合,在频率为49.4 Hz时,由于切负荷量的不同,曲线变化也不同,由于方案1切负荷50%,大于方案2

的33.3%,所以曲线明显高于曲线2,稳态频率高于曲线2,调整时间也较短。方案2、3的曲线比较接近,从表2可见,两方案下切负荷总量相同,所以稳态频率几乎相等,但是由于方案3在频率为49.6 Hz时就切除负荷,早于频率为49.4 Hz时动作的方案2,所以其最低频率略高于方案2。

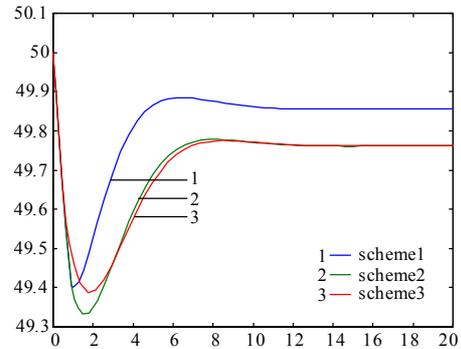


图7 功率缺额为 0.15 时的频率响应

Fig.7 Frequency response when  $\Delta P = 0.15$ 

#### 4.2 功率缺额为 0.25 (图8)

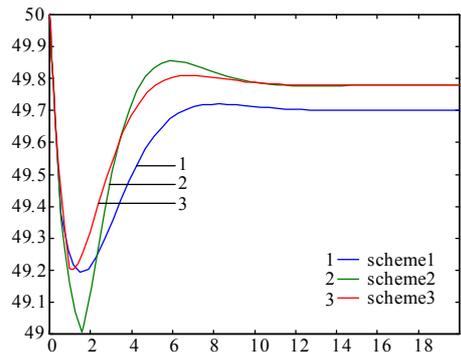


图8 功率缺额为 0.25 时的频率响应

Fig.8 Frequency response when  $\Delta P = 0.25$ 

由图8可见,曲线1动作了一步(共切负荷50%),曲线2、3各自动作了两步(共切负荷53.3%)。可见,曲线2、3下,由于切负荷总量大,恢复频率高于曲线1,且两者相近。但是由于动作频率的不同,动作频率高的方案3的最小频率高于方案2,且未出现超调,性能优于方案2。

#### 4.3 功率缺额为 0.35 (图9)

可以看出,当系统功率缺额较大时三种方案之间的差异变得不明显。但仍可以看出,曲线2、3的稳态频率几乎重合,而与方案1的稳态频率略有差异。并且在频率下降期间,曲线3略高于曲线2。

#### 4.4 分析比较

不同自适应方案在功率缺额较小时切负荷特性差异较大,如图7、8,但在功率缺额较大时差异就不明显了,如图9。通过比较不同自适应方案低频

减载特性曲线可以看出：在一定范围内，首轮切负荷量及动作频率的值越大其切负荷效果越好，但这样也增加了频率超调的几率，同时也可能影响系统运行的经济性。

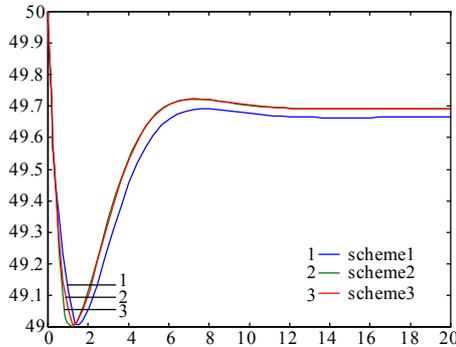


图9 功率缺额为 0.35 时的频率响应

Fig.9 Frequency response when  $\Delta P = 0.35$

### 5 结论

从自适应方案与传统方案和半适应方案的比较可以看出以下规律：

1) 传统方案由于切负荷量固定，当实际功率缺额与方案整定的切负荷量偏差较大时，其切负荷效果将变得较差（如图 3、5、6）。半适应方案中第一轮考虑了 ROCOF，对实际功率缺额进行了计算，首轮切负荷量与实际功率缺额一致，因此切负荷效果有所改善。自适应方案各轮切负荷量均与实际功率缺额一致，切负荷效果较半适应方案更好。

2) 功率缺额较小时，传统方案与调速器的配合不如半适应和自适应方案好，容易出现超调（如图 3）；半适应方案与自适应方案切负荷频率特性基本相同（如图 3、4）。功率缺额较大时传统方案容易出现切负荷不足，且频率下降严重；半适应方案由于只是第一步根据功率缺额动作，第二步切负荷按照整定值，所以对功率缺额较大的事故切负荷的效果不如自适应方案。

3) 不同的自适应方案也会影响切负荷的效果，从文中第四部分的分析可以看出：相同动作频率时，切负荷量大的方案下，曲线最低频率高；切除负荷量相同时，动作频率值大的，曲线最低频率高；总切负荷量相同时，曲线的稳态频率接近。考虑经济性和频率恢复特性，方案动作频率和切负荷量应当相互合理地配合。另外，切负荷量大小的影响要高于动作频率值高低的影响。由于通过分析  $t \rightarrow 0$  时刻系统 ROCOF 的值，可以在较短时间内计算出系统的总功率缺额，从而做出响应处理，这在防止事

故恶化、系统崩溃上有不可取代的重要性。

综合上述分析，可以看出：自适应方案与类似条件下半适应方案和传统方案在切负荷规律上有一定的相似性，比如：切负荷量大，切负荷时动作频率高则最低频率高。但比较不同功率缺额下，三种方案切负荷效果时，差异明显。总的来说，半适应和自适应方案性能好于传统方案，在功率缺额较小时，两者很接近，但功率缺额较大时，自适应方法对频率特性的恢复效果明显好于半适应方法。

### 参考文献

[1] Delfino B, Massucco S, Morini A, et al. Implementation and Comparison of Different Under Frequency Load-Shedding Schemes[A]. in: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2001. 307-312.

[2] 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.

[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 Ahedding[J]. Relay, 2007, 35 (14): 79-82.

[4] 杨博, 解大, 陈陈, 等. 电力系统低频减载的现状和应用[J]. 华东电力, 2002(9): 14-18, 72.

YANG Bo, XIE Da, CHEN Chen, et al. Current Status of Low Frequency Load Shedding in Power System and Its Application[J]. East China Electric Power, 2002(9): 14-18, 72.

[5] 余虹云, 顾锦汶. 华东电力系统低频减载方案的整定[J]. 浙江电力, 1995(1): 29-31.

YU Hong-yun, GU Jin-wen. Underfrequency Load Shedding Schemes' Design for East China Electrical Power System[J]. Zhejiang Electrical Power Press, 1995(1): 29-31.

[6] 安德逊 P M, 佛阿德 A A. 电力系统的控制与稳定[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979. 9-15.

Anderson P M, Fouad A A. Power System Control and Stability[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1979. 9-15.

- [7] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002. 581-626.  
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. 581-626.
- [8] Huang S J, Huang C C. Adaptive Approach to Load Shedding Including Pumped-storage Units During Underfrequency Conditions[A]. in: IEE Proceedings-Gener, Transm, and Distrib[C]. 2001. 165-171.
- [9] 曹柱中, 徐薇莉. 自动控制理论与设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003. 75-79.  
CAO Zhu-zhong, XU Wei-li. Automatic Control Theory and Design[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003. 75-79.

## 附录

现定义文中用到的几个参数<sup>[9]</sup>。

### 1) 最低频率

见图 10, 定义最低频率为频率下降所至最低并开始回升点, 即  $f_{\min}$ 。

### 2) 下降时间

定义下降时间为频率从 50 Hz 降至最低点的时间, 即图中  $t_{\min}$ 。

### 3) 调整时间

定义调整时间为系统频率值到达稳态值 ( $\pm 5\%$ ) 的最早时间, 即图中  $t_{\text{regulate}}$ 。

### 4) 稳态误差

定义稳态误差为系统频率稳态值  $f_{\infty}$  与额定频率 50 Hz 的差值:  $\Delta f = 50 - f_{\infty}$ 。

### 5) 最大超调量

定义最大超调量为暂态期间输出超出输出稳态的百分数:  $\delta = \frac{f(t_p) - f(\infty)}{f(\infty)} \times 100\%$ 。

超调量考察的是切负荷方案与调速器配合的情况。

### 6) 总切负荷量

总切负荷量指所切负荷的总量, 体现了切负荷整定方案的经济性。所切负荷量越少, 说明损失负荷较少, 方案经济性能越好。这在电力市场下, 是尤为重要的。

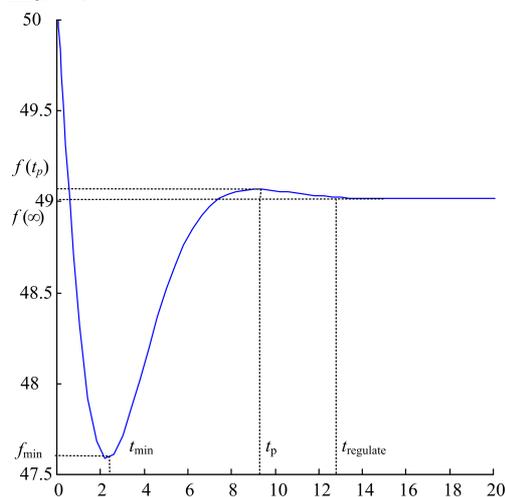


图 10 参数说明图

Fig.10 Characters definition

收稿日期: 2009-02-25; 修回日期: 2009-04-14

作者简介:

常喜强 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与仿真;

何恒靖 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统仿真;

解大 (1969-), 男, 副教授, 研究方向为 FACTS、并网型风力发电、电力系统仿真及智能电网。E-mail: xieda@xjtu.edu.cn

(上接第 67 页 continued from page 67)

LIU Xiao-dong, ZHU Zi-shu, CHEN Chen. Study of Overvoltage on Series Capacitor of 500 kV Transmission Lines[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31 (12): 142-146.

- [18] 王伯成.  $\pm 500$  kV 直流工程用 E 型、F 型无间隙金属氧化物避雷器的设计[J]. 电瓷避雷器, 2001(4): 24-28.  
WANG Bo-cheng. Design of E and F Types of Gapless MOA for  $\pm 500$  kV DC Project[J]. Insulators and Surge Arresters, 2001(4): 24-28.

- [19] 武宇平, 钱锋, 赵淑珍. 丰万顺串补与大房线 500 kV

串补站串补保护触发回路[J]. 华北电力技术, 2004(12): 24-28.

WU Yu-ping, QIAN Feng, ZHAO Shu-zhen. Protective Trigger Circuits of Feng-wan-shun and Datong-Fangshan Line 500 kV Series Compensation Equipment[J]. North China Electric Power, 2004(12): 24-28.

收稿日期: 2009-03-13; 修回日期: 2009-05-05

作者简介:

祁胜利 (1975-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、自动化技术。E-mail: hykb1228@sina.com