

# 考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制

傅 旭

(西北电力设计院,陕西 西安 710075)

**摘要:** 提出一种考虑不确定因素的电力系统静态安全的预防控制方法。首先,给出一种考虑预想事故发生概率和负荷水平不确定性的系统静态安全指标;然后通过将该指标加入到预防控制模型中,得到考虑不确定因素的预防控制策略,重点考虑采用发电机出力再调整和切负荷作为控制手段。鉴于负荷特性对系统的影响很大,采用 ZIP 负荷模型。我国某实际系统的仿真算例结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 电力系统; 静态安全分析; 预防控制; 负荷特性; 模型; 切负荷

**中图分类号:** TM 732

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.021

## 0 引言

电力系统的安全运行一直是电力工作者的研究热点<sup>[1-10]</sup>。为保证系统安全运行,一般要求系统满足  $N-1$  原则,当系统不满足时需要采用预防或者校正控制保证系统的安全性。而实际上由于预想事故发生概率大小不同,为了一个发生概率极小的事件而对系统采用预防控制难免失去经济性<sup>[11]</sup>。为此,建立一种考虑事故发生概率的静态安全指标对系统的实际运行有着重要的意义。总体而言,目前的静态安全分析和控制方法存在如下缺点。

**a.** 目前的实时静态安全分析只针对系统当前的负荷情况,这可能导致针对当前负荷水平的静态安全分析结果并不能反映下一个时刻的系统安全性,而实际运行时,要求分析结果应该有一定的超前性。

**b.** 目前的实时静态安全分析给出的评估结果一般是基于系统线路潮流是否过载或者节点电压是否越限,如文献[12]认为过负荷 120% 比过负荷 105% 严重。而实际上,这样的指标并不能真实地反映系统的严重程度,因为某些事故虽然造成的越限不十分严重但却很难校正<sup>[13-15]</sup>,所以并不能保证 120% 过载一定比 105% 过载对系统的影响严重,即不能完全按照事故后系统的越限情况来分析事故的严重程度。

**c.** 目前的静态安全校验(如  $N-1$  原则)没有考虑事故可能发生的概率,如果只针对事故发生概率极小的某一个故障而采用预防控制,那么势必失去经济性。

解决上述问题对保证系统的安全经济运行十分必要,本文认为可以从如下几个方面入手:

**a.** 在校验静态安全性时,考虑下一时刻系统负荷水平的不确定性因素;

**b.** 建立基于事故后系统负荷裕度的静态安全指

标,这种指标对事故严重程度的评估基于此事故下系统的负荷裕度,物理意义明确,而且事故后系统负荷裕度也正是运行人员需要了解的;

**c.** 考虑事故发生的概率。

为实现上述目的,本文提出了一种新的考虑概率因素的静态安全指标(SSI)。该指标基于系统的负荷裕度并考虑了下一时刻系统的负荷水平变化以及各个事故发生的概率。基于此指标,本文给出了一种新的考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制模型。我国某实际 682 节点 973 支路的仿真算例表明本文所提方法简单、有效。

## 1 考虑不确定因素的系统静态安全指标

### 1.1 相关概率分布

**a.** 预想事故发生概率。

本文假定各个预想事故的发生概率相互独立,各个预想事故的发生概率  $P_r(E_i)$  可用式(1)表示<sup>[12]</sup>:

$$P_r(E_i) = p_i \quad (1)$$

其中,  $E_i$  是第  $i$  个预想事故;  $p_i$  是其发生概率。这个假设一般是符合电力系统实际情况的。电力系统在制定运行方式并给定预防控制策略的时候,针对的是确定的预想故障集合。该故障集合由调度员预先给定并且假定其互相独立,若前后 2 个故障关联,比如一条线路断开,导致另外一条线路断开,则可将这前后 2 条线路断开的故障认为是  $N-2$  同时断开,将其作为一个独立的  $N-2$  故障而放入预想故障集合中。

**b.** 负荷增长模式。

根据短期负荷预测,可以预测下一时刻系统的负荷增长模式。鉴于负荷特性对电力系统的运行有很大的影响,本文采用 ZIP 负荷模型。因此,负荷增长模式可表示为:

$$P_{Di} = P_{Di}^0 (1 + \lambda k_{Di}) (a_{pi} U_i^2 + b_{pi} U_i + c_{pi}) \quad (2)$$

$$Q_{Di} = Q_{Di}^0 (1 + \lambda k_{Di}) (a_{qi} U_i^2 + b_{qi} U_i + c_{qi}) \quad (3)$$

$$P_{Gi} = P_{Gi}^0(1 + \lambda k_{Gi} + k_s) \quad (4)$$

其中,  $P_{Gi}^0$  是节点  $i$  的初始发电有功出力;  $P_{Di}^0$ 、 $Q_{Di}^0$  是节点  $i$  的负荷;  $k_{Di}$  和  $k_{Gi}$  是描述负荷和发电机出力随参数  $\lambda$  变化的常数; 参数  $k_s$  用来分配损耗, 是一个未知量;  $a_{pi}$ 、 $a_{qi}$ 、 $b_{pi}$ 、 $b_{qi}$ 、 $c_{pi}$  和  $c_{qi}$  是描述节点 ZIP 负荷组成比例的常量; 参数  $\lambda$  是描述系统下一时刻的负荷水平的参数, 统计资料表明<sup>[11]</sup>, 负荷水平在预测值附近变动的概率分布属于正态分布。本文考虑到实际电力系统由于受用户负荷总量的限制, 预测必然存在上限, 而不可能达到无穷大, 因此, 假定负荷分布为截断正态分布, 即:

$$\lambda = \begin{cases} N(\mu_\lambda, \sigma_\lambda^2) & \lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

### 1.2 系统静态安全指标的定义

本文将第  $i$  个预想事故的静态安全指标定义为第  $i$  个故障发生后预测的负荷水平大于系统实际的负荷裕度的概率 (本文中的负荷裕度为在式 (2) — (4) 的负荷增长模式下, 系统不出现运行约束越限或静态电压失稳的负荷参数  $\lambda$  的最大值)。若假设第  $i$  个故障发生后系统的负荷裕度为  $\lambda_c^i$ , 如图 1 所示, 则第  $i$  个故障的静态安全指标  $\delta_{SSi}$  为:

$$\delta_{SSi} = r(\lambda_c^i) = p_i \int_{\lambda_c^i}^{+\infty} \rho(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

其中,  $r(\lambda_c^i)$  是第  $i$  个故障的最大负荷系数  $\lambda_c^i$  的函数, 表示负荷系数  $\lambda$  大于  $\lambda_c^i$  的概率;  $\rho(\lambda)$  是预测的负荷参数  $\lambda$  的概率密度函数;  $p_i$  是第  $i$  个故障的发生概率。

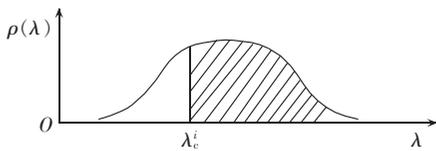


图 1 第  $i$  个预想事故下静态安全指标的示意图

Fig.1 Schematic diagram of SSI under pre-defined contingency  $i$

通过累加所有预想事故的静态安全指标, 可以得到系统的静态安全指标 (SSSI) 为:

$$\delta_{SSi} = \sum_{i=0}^m \delta_{SSi} \quad (6)$$

其中,  $m$  是预想事故的总数。当  $i=0$  时,  $\delta_{SSi}$  为基态情况下的静态安全指标。

从式 (6) 可以看出 SSSI 具有如下特点: 考虑了每个预想事故的发生概率; 考虑了连续监控间隔内负荷水平的随机特性。

### 1.3 SSSI 的计算

SSSI 的计算主要包括 2 个步骤: 计算每个预想事故的静态安全指标; 累计所有预想事故的静态安全指标。图 2 给出了 SSSI 的计算流程。在 SSSI 的计算中, 耗时最长的是各个预想事故的负荷裕度的计算,

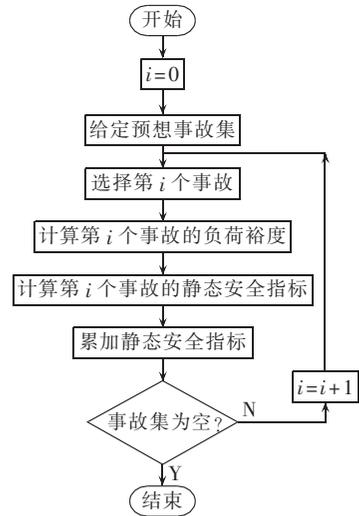


图 2 SSSI 的计算流程

Fig.2 Flowchart of SSSI calculation

为提高计算速度, 采用文献 [16-17] 的计算方法。

## 2 预防控制模型

### 2.1 负荷裕度的计算

文献 [16-17] 提出了一种负荷裕度的快速算法, 本文采用该方法快速计算各预想故障的负荷裕度, 具体见文献 [16-17]。

### 2.2 预防控制模型

#### 2.2.1 负荷裕度的灵敏度

a. 线路功率或电压幅值为有效约束。  
这种情况下的负荷裕度灵敏度为<sup>[18]</sup>:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\boldsymbol{\mu}^T}{\boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\mu}} [\boldsymbol{\eta}_{xl} | \mathbf{g}_{xl} | \mathbf{g}_{ul} | \boldsymbol{\eta}_{ul} | \mathbf{g}_{\lambda} |] \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\eta}_{\lambda} | \mathbf{g}_{\lambda} | - \boldsymbol{\eta}_{xl} | \mathbf{g}_{xl} | \mathbf{g}_{\lambda} | \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{g}_{xl} |$ 、 $\mathbf{g}_{ul} |$  和  $\mathbf{g}_{\lambda} |$  为潮流方程在临界点  $(\mathbf{x}_c, \lambda_c, \mathbf{u}_c)$  处对系统状态变量  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{u}$  和  $\lambda$  的雅可比矩阵;  $\boldsymbol{\eta}_{xl} |$ 、 $\boldsymbol{\eta}_{ul} |$  和  $\boldsymbol{\eta}_{\lambda} |$  为系统有效约束 (支路功率或节点电压) 在临界点  $(\mathbf{x}_c, \lambda_c, \mathbf{u}_c)$  处对系统状态变量  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{u}$  和  $\lambda$  的雅可比矩阵。

b. 电压稳定极限为有效约束。

电压稳定极限主要有鞍点分歧和约束诱导分歧 2 种形式。其中约束诱导分歧可以用类似于热极限约束或电压幅值约束的方法计算其负荷裕度灵敏度, 而鞍点分歧的负荷裕度灵敏度的计算如下<sup>[18-19]</sup>:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{u}} = -\frac{1}{\mathbf{w}^T \mathbf{g}_{\lambda} |} \mathbf{w}^T \mathbf{g}_{\lambda} | \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{w}$  为雅可比矩阵奇异点处的与 0 特征值对应的左特征向量。

#### 2.2.2 SSSI 的灵敏度

考虑每个预想事故, 可以得到一个灵敏度矩阵  $\mathbf{T}$ :

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_{01} & \cdots & t_{0n} \\ \vdots & & \vdots \\ t_{m1} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中,  $n$  是参与预防控制节点的总数;  $m$  是预想事故集中事故总数。矩阵  $T$  中的每个元素  $t_{ij} (i \neq 0)$  表示第  $i$  个预想事故下的负荷裕度对第  $j$  个控制变量  $u_j$  的灵敏度, 当  $i=0$  时,  $t_{ij}$  表示基态情况下的系统负荷裕度灵敏度。

SSSI 对控制量  $u_j$  的灵敏度可以通过对式(6)求导得到:

$$L_j = \frac{\partial \delta_{\text{SSSI}}}{\partial u_j} = \frac{\partial \sum_{i=0}^m \delta_{\text{SSSI}}^i}{\partial u_j} = \sum_{i=0}^m \frac{\partial r(\lambda_c^i)}{\partial \lambda_c^i} \frac{\partial \lambda_c^i}{\partial u_j} = \sum_{i=0}^m k_i t_{ij} \quad (11)$$

$$k_i = \frac{\partial \delta_{\text{SSSI}}^i}{\partial \lambda_c^i} = p_i \frac{\partial r(\lambda_c^i)}{\partial \lambda_c^i} = p_i \times$$

$$\frac{\partial \left( \int_{\lambda_c^i}^{+\infty} \rho(\lambda) d\lambda \right)}{\partial \lambda_c^i} = -p_i \rho(\lambda_c^i) \quad i=0, 1, \dots, m \quad (12)$$

其中,  $t_{ij}$  是矩阵  $T$  中对应的元素;  $k_i$  是第  $i$  个预想事故的静态安全指标对  $\lambda_c^i$  的导数。

### 2.2.3 预防控制模型

当 SSSI 大于临界值时, 需要采用控制措施使 SSSI 小于或等于预先给定的临界值。将各个控制变量分解成  $\Delta u_j = \Delta u_j^+ - \Delta u_j^-$ ,  $\Delta u_j^+, \Delta u_j^- \geq 0$ , 则目标函数可以表示成:

$$\min \sum_{j=1}^{n_c} (w_j^+ \Delta u_j^+ + w_j^- \Delta u_j^-) \quad (13)$$

其中,  $n_c$  是参与控制的节点的总数;  $w_j^+$  和  $w_j^-$  分别是控制  $u_j$  的增出力 and 减出力报价, 对于可切负荷而言,  $\Delta u_j^+ = 0$ ,  $w_j^-$  是其削减价格。

约束为:

$$\sum_{j=1}^{n_c} L_j (\Delta u_j^+ - \Delta u_j^-) \leq \delta_{\text{SSSIth}} - \delta_{\text{SSSI}} \quad (14)$$

$$z_i^{\min} \leq z_i^0 + \sum_{j=1}^{n_c} \frac{\partial z_i}{\partial u_j} (\Delta u_j^+ - \Delta u_j^-) \leq z_i^{\max} \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{n_c} (\Delta u_j^+ - \Delta u_j^-) = 0 \quad (16)$$

$$0 \leq \Delta u_j^+ \leq u_j^{\max} - u_j^0 \quad (17)$$

$$0 \leq \Delta u_j^- \leq u_j^0 - u_j^{\min} \quad (18)$$

其中,  $\delta_{\text{SSSIth}}$  是 SSSI 的临界值;  $L_j$  是 SSSI 对控制变量  $u_j$  的灵敏度;  $\partial z_i / \partial u_j$  是约束  $z_i$  (线路功率或节点电压幅值) 对控制变量  $u_j$  的灵敏度。式(14)为 SSSI 约束; 式(15)为  $z_i$  在基态情况下的约束; 式(16)为忽略网络损耗变化的功率平衡约束; 式(17)和(18)为控制变量约束。

从上述优化模型中可以看出, 本文所提预防控制方法用 SSSI 模拟系统的安全水平, 与现有方法相比具有如下特点:

- 线路功率、节点电压幅值和静态电压稳定约束统一加以考虑;
- 考虑了每个预想事故的发生概率;
- 考虑了连续监控间隔内负荷水平的随机特性。

需要指出的是, 具体如何制定  $\delta_{\text{SSSIth}}$ , 需根据系统的具体情况和运行经验详细加以研究。一般而言,  $\delta_{\text{SSSIth}}$  有 2 种极端的情况: 一种是要要求  $\delta_{\text{SSSIth}} = 0$ , 即预防控制策略应保证任何一个预想事故发生的情况下系统均不存在安全问题, 该种情况下, 对应了一个预防控制策略的成本; 另外一种情况是, 不考虑采用预防控制, 直接计算  $\delta_{\text{SSSI}}$ , 并将其作为 SSSI 的临界值  $\delta_{\text{SSSIth}}$ , 这相当于预想故障发生后, 采用校正控制策略保证系统的安全, 校正控制策略成本对应了  $\delta_{\text{SSSIth}}$ 。最合理的  $\delta_{\text{SSSIth}}$  应该在第 2 种情况下的  $\delta_{\text{SSSI}}$  和 0 之间。笔者准备在下一阶段对  $\delta_{\text{SSSIth}}$  的确定详细加以研究。

## 3 算例分析

本节以我国某实际 682 母线系统 2010 年某天实际的 3 个不同时刻(本文分别标记为 Case 1、Case 2、Case 3)的运行数据来验证所提的 SSSI 和预防控制方法。根据历史统计数据, 可以得到每个预想事故的概率, 预想事故集包括 115 个断线故障, 由 1 个  $N-3$ 、10 个  $N-2$  和 104 个  $N-1$  故障组成。节点电压幅值极限为 (0.90, 1.02) p.u.。SSSI 的临界值  $\delta_{\text{SSSIth}}$  设定为 0.05。假定预测 3 个时刻的负荷水平正态分布均为:

$$\lambda = \begin{cases} N(1.4, 4) & 0.5 < \lambda < 5 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

### 3.1 恒定功率负荷模型的计算结果

当所有负荷都取为恒定功率负荷模型时, 各个预想事故的静态安全指标如图 3 所示(限于篇幅, 只给出 16 个故障的结果)。Case 1、Case 2 和 Case 3 的  $\delta_{\text{SSSI}}$  分别为 0.092、0.395、0.597。预防控制的目的是降低  $\delta_{\text{SSSI}}$ , 使其低于或者等于临界值(0.05)。表 1—3 给出了预防控制结果。随着迭代的进行, 系统的  $\delta_{\text{SSSI}}$  变化如图 4 所示。

为考察 SSSI 的临界值对预防控制费用的影响, 将 SSSI 的临界值从 0.02 变化至 0.1, 并针对每个 SSSI 的临界值分别计算预防控制费用。图 5 给出了不同的 SSSI 临界值下预防控制费用的变化曲线。可以看出, 随着 SSSI 的临界值的增加, 预防控制费用逐渐

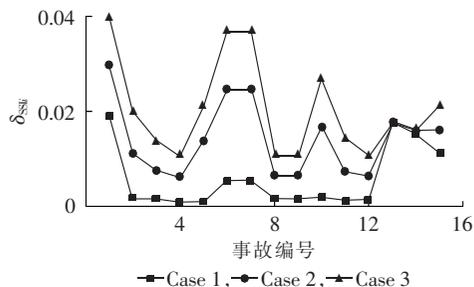


图 3 各个预想事故的静态安全指标  
Fig.3 SSI of each pre-defined contingency

表 1 预防控制策略 (Case 1)

Tab.1 Preventive control strategy of Case 1

发电机出力调整		切负荷	
节点号	调整量/MW	节点号	切负荷量/MW
287	-15.76	89	23.97
288	-12.73	92	4.86
289	-11.09	498	15.76
384	-5.00		

表 2 预防控制策略 (Case 2)

Tab.2 Preventive control strategy of Case 2

发电机出力调整		切负荷	
节点号	调整量/MW	节点号	切负荷量/MW
287	-22.611	89	58.1370
288	-20.187	92	4.8591
289	-18.877	498	22.6110
292	-18.932		
384	-5.000		

表 3 预防控制策略 (Case 3)

Tab.3 Preventive control strategy of Case 3

发电机出力调整		切负荷	
节点号	调整量/MW	节点号	切负荷量/MW
281	-45.565	89	96.510
287	-28.089	92	28.239
288	-26.149	498	28.089
289	-25.101		
292	-18.932		
384	-9.000		

表 4 ZIP 负荷模型

Tab.4 ZIP load model

ZIP 类型	Z/%	I/%	P/%
A	0	0	100
B	0	20	80
C	20	0	80
D	10	10	80
E	20	30	50

$I$ 、 $P$  分别表示恒定阻抗负荷、恒定电流负荷、恒定功率负荷在总负荷中所占的比例。图 6、7 给出了不同的 ZIP 负荷模型下系统的  $\delta_{SSSI}$  和预防控制费用。可以看出,不同的 ZIP 模型对应于不同的  $\delta_{SSSI}$  和预防控制费用,恒定功率负荷模型的  $\delta_{SSSI}$  和预防控制费用较高。因此,制定控制策略时,如果能采用准确的负荷模型则可以得到更准确的结果,进而获得更多的经济效益。

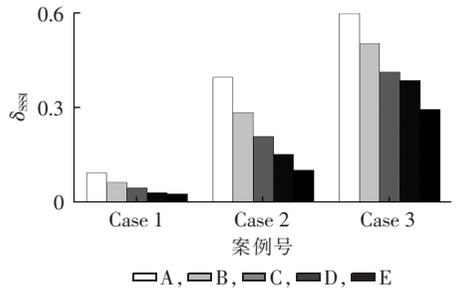


图 6 ZIP 负荷模型对 SSSI 的影响

Fig.6 Effect of ZIP load model on SSSI

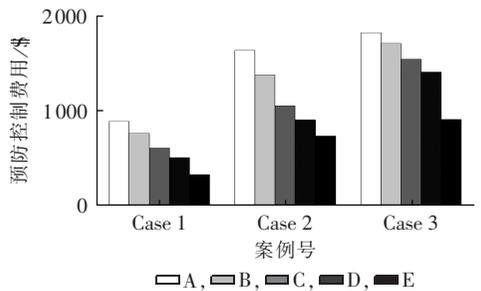


图 7 ZIP 负荷模型对预防控制费用的影响

Fig.7 Effect of ZIP load model on preventive control cost

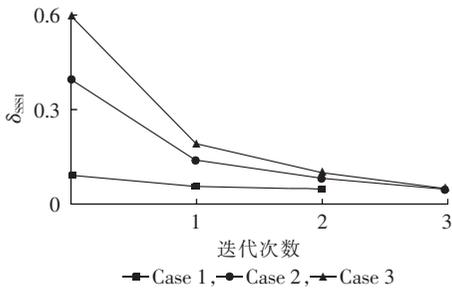


图 4 迭代过程中的 SSSI 变化曲线

Fig.4 Variation curve of SSSI during iteration

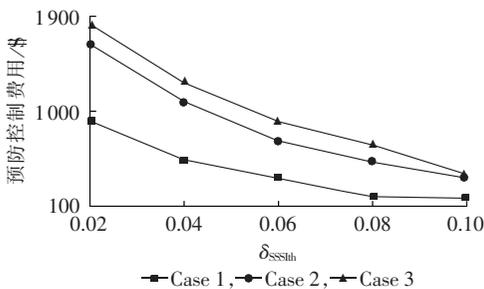


图 5 不同 SSSI 临界值下预防控制费用

Fig.5 Preventive control cost for different thresholds of SSSI

降低。因此,如何确定一个合适的 SSSI 的临界值是一个需要进一步研究的问题。

### 3.2 ZIP 负荷模型的计算结果

本节采用表 4 所示的不同的 ZIP 负荷模型来说明负荷特性对 SSSI 和预防控制费用的影响,表中  $Z$ 、

## 4 结论

本文提出了考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制方法。该方法通过 SSSI 来反映预想事故发生概率和负荷水平不确定性,具有如下特点:

- 采用 SSSI 来模拟系统的安全水平,该指标考虑了预想事故发生概率和负荷水平不确定性,从而可以更合理地描述系统的安全水平;
- 通过将 SSSI 作为约束加入最优潮流模型中,利用线性优化技术求解该问题;
- 可以方便地在 SSSI 计算中考虑 ZIP 负荷模型的影响。

我国某实际系统的仿真算例验证了本文方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6.  
HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America Power Grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.
- [2] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.  
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America Power Grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [3] 傅旭, 付翀丽. 电力系统静态电压稳定裕度的快速算法[J]. 陕西电力, 2008, 36(6): 34-38.  
FU Xu, FU Chongli. Fast method for computing power system load margin to voltage collapse[J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 36(6): 34-38.
- [4] 傅旭, 付翀丽. 电力系统静态电压稳定分析中的校正控制算法[J]. 陕西电力, 2008, 36(12): 44-47.  
FU Xu, FU Chongli. Corrective control algorithm for voltage stability analysis in power system[J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 36(12): 44-47.
- [5] 王锡凡. 电力市场条件下电网的安全保证体系[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 7-13.  
WANG Xifan. Electric network security setup in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 7-13.
- [6] 牟晓明, 李志民. 一种计算电压稳定边界的两阶段潮流方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 72-77.  
MOU Xiaoming, LI Zhimin. Two-stage power flow method for calculating voltage stability margin[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 72-77.
- [7] 邱革非, 束洪春, 于继来. 一种提高断面功率传输能力的无功补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 19-23.  
QIU Gefei, SHU Hongchun, YU Jilai. Var compensation enhancing interface power transmission[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 19-23.
- [8] 随慧斌, 赵建国, 李可军, 等. 考虑不均衡区域负荷增长的在线电压稳定评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 57-61.  
SUI Huibin, ZHAO Jianguo, LI Kejun, et al. On-line voltage stability assessment considering uneven growth of regional load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 57-61.
- [9] 文学鸿, 袁越, 鞠平. 静态电压稳定负荷裕度分析方法比较[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 59-62.  
WEN Xuehong, YUAN Yue, JU Ping. Comparison between CPF and PDIP for voltage stability margin evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 59-62.
- [10] 许琦. “N-1”预想事故下满足静态电压稳定约束的ATC算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 81-85.  
XU Qi. Fast ATC algorithm with voltage stability constraint for N-1 contingency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 81-85.
- [11] XIAO Fei, MCCALLEY J D. Risk-based security and economy tradeoff analysis for real-time operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 262-272.
- [12] NI Ming, MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. On-line risk-based security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 258-265.
- [13] CASTRO C A, BOSE A. Correctability in online contingency analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 807-814.
- [14] CASTRO C A, BOSE A. Correctability of voltage violation in on-line contingency analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1651-1657.
- [15] FU Xu, WANG Xifan. Determination of load shedding to provide voltage stability[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(3): 515-521.
- [16] 傅旭, 王锡凡, 解利斌. 考虑N-1静态安全的电力系统最大负荷能力计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 6-10.  
FU Xu, WANG Xifan, XIE Libin. A new method of calculating maximum loadability of power system considering N-1 static security[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 6-10.
- [17] FU Xu, WANG Xifan. Unified preventive control approach considering voltage stability and thermal overload[J]. IET Gener Transm Distrib, 2007, 1(6): 864-871.
- [18] CHEN H, CANIZARES C A. Web-based security cost analysis in electricity markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 659-667.
- [19] GREENE S, DOBSON I, ALVARADO F L. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 262-272.

## 作者简介:



傅旭(1976-),男,辽宁锦州人,高级工程师,注册咨询工程师,博士,从事电力系统规划分析方面的研究、设计工作(E-mail: fuxu@nwepdi.com)。

## Static security preventive control considering uncertainty factors for power system

FU Xu

(Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** An algorithm of static security preventive control is proposed for power system with the consideration of uncertainty factors. A static security index of power system is proposed, which considers the probability of pre-defined contingencies and the uncertainty of load level. The preventive control strategy is obtained by adding the index into the preventive control model, which emphasizes the generator rescheduling and load shedding. For the large influence of load characteristics on system, the ZIP load model is adopted. The simulative result of a practical domestic system verifies its effectiveness.

**Key words:** electric power systems; static security analysis; preventive control; load characteristic; models; electric load shedding