第47卷第6期 2007年11月

文章编号:1000-8608(2007)06-0890-07

电压安全在线风险指标及其灵敏度评估

彭 昱,周 玮,孙 辉*,邹积岩

(大连理工大学 电子工程系, 辽宁 大连 116024)

摘要:从分析策略的角度通过引入快速 CS&R(事故筛选和排序)获取风险指标不为 0 的事故,采用网损灵敏度二阶指标确定负荷水平期望值的方法代替常规的连续潮流法等快速的分析技术,减少风险指标及其灵敏度的计算量,用以提高风险评估的效率.通过风险灵敏度的计算为选择适当的预防和控制手段以增强电压安全提供了有效的依据. IEEE118 测试系统 仿真计算验证了该评估方法的快速和准确性适合于电压安全风险评估的在线应用.

关键词:电压安全;风险指标;风险灵敏度;网损灵敏度二阶指标;CS&R中图分类号:TM712;TM744 文献标识码:A

0 引 言

电压安全问题(包括电压稳定和低电压)一 直是电力系统运行研究人员关注的热点[1,2]. 目 前通用的分析方法是忽略由于节点负荷的随机波 动、发电机的再调配以及网络元件的随机开断给 系统带来的随机性,而以确定的方式进行电压安 全评估,并选用最严重、最可信的事故(通常是风 险度较低但成本较高的事件)进行校验.其结果 是以保守的方式将系统控制在某个确定的"安全" 区域内运行,从而避免了所有可能的危险. 随着 电力市场的开放,以及环境和经济的原因,系统往 往运行在这种"保守"的运行极限甚至超过该极 限. 这种经济性和安全性之间的矛盾促使人们迫 切需要了解在这样的状态下系统运行承受的风险 程度:如果进一步加重(或减轻)系统负担或超载 使用设备的风险变化趋势如何,以及由此获得的 效益与风险的关系等. 基于风险的电压安全分析 能够定量地考虑事故的可能性和严重性,并通过 引入电压安全风险指标,对电力系统电压安全提 供一个全面的认识,因此具有重要的现实意义.

电力系统电压安全涉及电压稳定和低电压两 个方面的问题.许多研究者从不同角度进行了较 为深入的探讨,如文献[3~5]主要进行电压稳定 概率分析的研究;文献[6~8]将电压稳定与低电 压的安全问题作为一个整体进行研究;文献[9~12]将电压安全风险评估作为基于风险的安全评估方法(RBSA)的一部分进行研究.

本文侧重于风险评估在电压安全分析中的在 线应用,主要强调在分析策略上采用一些快速的 分析方法.如分别采用针对电压崩溃和低电压的 两种CS&R(事故筛选和排序)方法对具有较长事 故列表进行分析从而快速获取风险指标不为0的 事故;在电压崩溃的裕度计算中将灵敏度二阶指 标确定电压稳定负荷裕度的方法^[13]代替常规的 CPF(连续潮流法);在概率评估中采用解析法代 替计算量过大的蒙特卡罗法^[3].

1 电压安全风险评估模型

1.1 电压安全概率评估模型

概率的评估有解析法和蒙特卡罗法.蒙特卡 罗法虽然算法简单,局限性小,但计算量很大,不 适合于在线分析.本文考虑两种不确定性因素: 事故的概率和运行状况概率.

(1) 事故的概率模型

在风险评估中考虑事故发生的概率服从泊松 分布^[6,7],表示为

$$P_{\rm r}(E_i) = (1 - \mathrm{e}^{-\lambda_i}) \tag{1}$$

其中 $P_r(E_i)$ 代表事故发生的概率值; λ_i 为每单位

收稿日期: 2006-03-15; 修回日期: 2007-09-18.

作者简介:彭 昱(1973-),女,博士生,E-mail:plyw@sina.com;孙 辉*(1964-),女,教授,博士生导师;邹积岩(1954-),男, 教授,博士生导师.

时间事故 E_i 发生的频率.

则系统不发生故障的概率为

$$P_{\rm r}(NE_i) = \left(1 - \sum P_{\rm r}(E_i)\right) \tag{2}$$

(2) 负荷模型

在风险评估中考虑负荷服从正态分布,即

$$L \sim N(\mu_L, \sigma_L^2)$$
 (3)

其中 μ_L 为短期负荷预测提供的负荷期望值; σ_L^2 为 其方差.

(3) 电压幅值和最大负荷裕度模型

在风险评估中考虑 Y(电压幅值和最大负荷) 也服从正态分布:

$$Y \sim N(E[Y], \boldsymbol{S}_{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{V}_{X} \boldsymbol{S}_{X})$$
(4)

其中 E[Y] 为电压幅值或最大负荷水平的期望 值, S_x 为它们对系统运行参数的灵敏度, V_x 为运 行参数的协方差.

1.2 严重性函数的模型

严重性函数描述了特定运行状态下电力系统 所遭受事故的严重程度(影响、后果或成本).

 1.2.1 低电压的严重性函数模型 图 1 给出了 低电压的严重性函数的离散型和连续型两种形 式^[6,11].



1.2.2 电压失稳严重性函数模型 电压失稳的 严重性函数所描述的对象是系统而不是元件.在 电压失稳分析中,本文采用对应鞍节分叉点的最 大负荷极限来反映电压失稳程度,并将负荷裕度 百分数定义为

$$M = \frac{L_{\rm max} - L_{\rm f}}{L_{\rm f}} \times 100\%$$
 (5)

式中: L_{max} 为最大负荷水平; L_f 为预估负荷水平.

图 2 表示了采用负荷裕度百分数定义的离散 和连续两种严重性函数.即当负荷裕度百分数小 于某个确定的阈值(*M*_{max})时,对应的事故将可能 导致电压失稳.



Fig. 2 Severity function of voltage stability lost

1.3 风险的模型

假设事故的发生仅仅取决于设备的开断,因 此对所有可能运行状态下事故发生的概率是一样 的.则给定事故 *j* 的某个节点 *i* 的低电压风险模 型可以表示为

$$Risk(V_i|E_j) = \int_{0}^{+\infty} P_r(V_i|E_j) \times Sev(V) dV = \int_{0}^{+\infty} Sev(V) \times N(\overline{V}_i, \sigma_i|E_j) dV$$
(6)

其中 $P_r(V_i|E_j)$ 是事故j的情况下节点i的低电压的概率,其服从均值为 \overline{V}_i 、标准差为 σ_i 的正态分 布;Sev(V)为低电压的严重性函数.

给定事故 *j* 的系统电压失稳的风险模型可以 表示为

$$Risk(M|E_{j}) = \int_{-\infty}^{+\infty} Sev(M)P_{r}(M|E_{j})dM = \int_{-\infty}^{+\infty} Sev(M)N(\overline{M},\sigma|E_{j})dM \quad (7)$$

式中: $P_r(M|E_j)$ 是事故 E_j 时裕度为M时的概率, 其服从均值为 \overline{M} 、标准差为 σ_M 的正态分布. Sev(M)为电压崩溃的严重性函数.

1.4 风险的灵敏度模型

1.4.1 低电压风险的灵敏度模型 若严重性函数采用连续型

$$Sev(V) = \begin{cases} aV + b; V \leq V_{\max} \\ 0; V > V_{\max} \end{cases}$$
(8)

将式(8)代入式(6)得

$$Risk(V_i|E_j) = \int_{0}^{V_{\text{max}}} (aV+b) \times N(\overline{V}_i, \sigma_i|E_j) dV$$
(9)

(1) 风险指标对电压期望值的灵敏度

$$\frac{\partial Risk(V_i|E_j)}{\partial \overline{V}_i} = \frac{\partial \int_{0}^{V_{\max}} (aV+b) \times N(\overline{V}_i, \sigma_i|E_j) dV}{\partial \overline{V}_i} \quad (10)$$

(2) 风险指标对控制参数的灵敏度

这里的控制参数可以为节点(除平衡节点外) 的注入有功、节点注入无功(所有 PQ 节点)和节 点电压幅值(所有 PV 节点).

$$\frac{\partial Risk(V_i|E_j)}{\partial P} = \frac{\partial Risk(V_i|E_j)}{\partial V_i} \frac{\partial \overline{V}_i}{\partial P}$$

$$\frac{\partial Risk(V_i|E_j)}{\partial Q} = \frac{\partial Risk(V_i|E_j)}{\partial V_i} \frac{\partial \overline{V}_i}{\partial Q} \quad (11)$$

$$\frac{\partial Risk(V_i|E_j)}{\partial V_{ii}} = \frac{\partial Risk(V_i|E_j)}{\partial \overline{V}_i} \frac{\partial \overline{V}_i}{\partial V_{ii}}$$

 4.2 电压稳定风险灵敏度模型 若严重性函 数采用连续型

$$Sev(M) = \begin{cases} aM + b; \ M \leqslant M_{\max} \\ 0; \ M > M_{\max} \end{cases}$$
(12)

将式(12)代入式(7)得

$$Risk(M|E_{j}) = \int_{-\infty}^{M_{max}} (aM+b)N(\overline{M},\sigma|E_{j})dM$$
(13)

(1) 风险指标与最大负荷期望值的灵敏度

$$\frac{\partial Risk(M|E_j)}{\overline{M}} = \frac{\partial \left(\int\limits_{-\infty}^{M_{\max}} (aM+b)N(\overline{M},\sigma|E_j)dM\right)}{\partial \overline{M}} \quad (14)$$

(2) 风险指标与控制参数的灵敏度

这里的控制参数可以为节点(除平衡节点外) 的注入有功、节点注入无功(所有 PQ 节点)和节 点电压幅值(所有 PV 节点).

$$\frac{\partial Risk(M|E_j)}{\partial P} = \frac{\partial Risk(M|E_j)}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial P}$$
$$\frac{\partial Risk(M|E_j)}{\partial Q} = \frac{\partial Risk(M|E_j)}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial Q} \quad (15)$$
$$\frac{\partial Risk(M|E_j)}{\partial V_{\text{set}}} = \frac{\partial Risk(M|E_j)}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial V_{\text{set}}}$$

2 电压安全风险指标及其灵敏度在 线评估

电压安全分析的在线应用除了在硬件方面采 用多个处理器的并行技术外,首先应将电力系统 的不确定因素采用不同的概率分布函数表示,从 而替代了蒙特卡罗法,降低了风险评估的计算量. 但风险评估研究往往取决于评估内容本身的研究 进展情况,因此在分析策略上如何将一些新的分 析技术用于更加快速地获取风险指标及其灵敏度 是本文需要进一步探讨的问题. 从式(6)、(7)中可知,电力系统风险值的计 算核心包括了3个部分,一个是事故发生的概率, 一个是运行状况的概率,还有就是相应的严重性 评估.因此为了快速获得风险值,在计算之前应 进行一些简单的分析工作,根据历史数据将有较 大年故障率的事故形成一个事故初表,其余事故 发生的概率视为0.另一方面,对列表中的事故进 行事故后的潮流计算,如果解不存在,那么说明这 些事故中发生低电压或电压崩溃的概率为1而严 重性为A(低电压)或B(电压崩溃)(见1.2节). 这样获得了一个缩短后的事故列表.针对电压安 全的两个方面还可以分别做如下工作.

2.1 电压稳定风险评估

对电压崩溃的风险值计算还可以做以下的简 化:

(1)根据连续型严重性函数可知,当裕度百分数大于某个阈值时,其严重性函数的值为0,该事故下发生电压崩溃的风险值为0,这样就避免了对其负荷裕度及其方差的计算.具体办法是将负荷和发电机按照既定方向增长至原负荷的(100% + M_{max})如110%,这样在新的事故列表中再进行一次事故后潮流计算,如果潮流解存在,说明在该事故下裕度充足,严重性为0.通过这个计算,整个事故列表其实已经简化了很多,这主要取决于这个阈值的大小,阈值越小,列表越短,其实大部分的事故已经在这一步被筛选掉了.

(2)针对新的事故列表将负荷的增加量以一 个百分数(如1%或者0.5%)递减,将事故进行 归类和大致的排序^[14].

(3) 根据上面形成的以大致的负荷裕度为标 准的事故列表,进行更准确的负荷裕度计算,并且 进行相应的风险值计算.电压安全中的电压稳定 风险评估随着电压稳定的深入研究对如何计算负 荷裕度的方法有了很大进展.常用的主要有连续 潮流法^[15]、指标法^[16]或非线性规划^[17]等方法. 虽然连续潮流法和非线性规划法可以方便地计及 各种约束,获得的负荷裕度准确性高,但计算量过 大,不适合在线应用.相对而言大多数用于计算 负荷裕度的指标的计算量较小,但往往忽略了无 功限制等因素从而导致裕度估算偏于乐观.本文 采用的基于网损灵敏度二阶指标的裕度求取算法 补偿了一阶指标的非线性,提高了计算的准确 性^[13].

2.2 低电压风险评估

若对系统进行低电压风险计算,应考虑:

(1)本文对低电压事故排序采用文献[18]介 绍方法,即将线路和发电机开断模拟为节点注入 功率的增加,增加的功率等于原线路上流过的功 率,同样道理发电机开断后的节点功率变化也为 开断前发电机的输出功率.那么线路的开断也就 等同于功率传输,从而保证了导纳矩阵和雅克比 及灵敏度矩阵不变,快速获得事故后的电压.同 时进行($V_i - V_{min}$)比较,获得事故后低电压的节 点数 k,并根据计算低电压指标 $I_V = \sum_{i=1}^{k} (V_{min} - V_i)$ 对事故进行排序.

(2)根据新的事故列表进行详细的断线潮流 分析,获得相应事故下各低电压节点的电压期望 值和方差,最后计算累加后的给定事故的系统低 电压的风险值.当连续出现几个指标为0的事故 后,就可以判断排在后面的事故都不造成系统低 电压,从而大大减少了断线后的潮流计算量.

3 计算实例

本文以 IEEE118 节点测试系统作为算例^[9], 对其进行电压安全风险评估.

3.1 系统低电压的风险评估

3.1.1 低电压的风险值计算 首先假设未来 1 h 内负荷期望值为基态时负荷,其标准差为 5%. 严重性函数中离散型的 V_1 为 0.92,而连续型函数 的 V_{max} 选为 0.95. 本文选择 4 个事故组成事故初 集.

表1给出了预想事故初集中事故发生的年故 障率以及未来1h内的事故发生概率和系统不发 生故障的概率(事故的年故障率除以 8 760,再根 据式(1)和式(2)计算)以及其低电压指标和排序 结果.表2和表3为预想事故集中低电压节点的 电压均值和方差.

表1 低电压事故排序和发生概率

m '		т	1	•	1.	1	1	- 1	• 1 •	•
1.0	h I		oltago	contingonou	ronzing	ond	nrok	20h	1	1 + 17
1.0			ULLAPE.	COMPRESENCE	Tanking	anu		101	,,,,	II V
	- · ·		~B		8		r			

皮旦	检由化	事故年	未来 1 h 事故	低电压
17 5	制电线	故障率	发生概率	指标
C_1	断线 76-77	0.13	1.484×10^{-5}	0.0767
C_2	发电机 49 故障	0.02	0.228 3 $ imes$ 10 ⁻⁵	0.021 5
C_3	断线 69-75	0.7	$7.99 imes10^{-5}$	0.020 3
C_4	断线 64-65	0.2	$2.283 \ 1 imes 10^{-5}$	0.013 2
C_0	正常		0.999 9	0.011 6

表 2 给定事故下低电压节点的电压均值

Fab. 2	Mean	value	of	low	voltage	buses	under	given
	contin	genev						D11

节点	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	
52	_		0.945 2		_	
53	0.946 0	0.946 0	0.941 0	0.946 0	0.944 4	
76	0.943 0	0.903 3	0.943 0	0.942 9	0.943 0	
118	0.949 4	0.924 0	0.949 3	0.940 8	0.949 4	

表 3 给定事故下低电压节点的电压方差

Tab. 3 The variance of low voltage buses under given contingency

节点	$C_0/10^{-6}$	$C_1/10^{-4}$	$C_2/10^{-6}$	$C_{3}/10^{-5}$	$C_4/10^{-6}$
52	_		0.674 5		
53	0.875 8	0.008 8	0.929 0	0.087 6	0.902 3
76	0	0.361 6	0	0.810 4	0
118	0.031 6	0.148 1	0.032 3	0.435 5	0.031 5

表4给出了采用连续型和离散型的严重性函数的给定事故以及系统低电压的风险值.由于连续型函数不仅考虑了电压水平从0.92到0.95之间的低电压风险,而且当电压低于0.92时其严重性值相应增加且大于1,这样能捕捉到更多的信息,所以其风险值比采用离散型函数时的大且较为合理.

表 4 给定事故和系统低电压风险值

Tab. 4 The total low voltage risk of given contingencies and system

声 ##		离散	连续			
争议	未考虑概≊	率 考虑概率	未考虑概算	率 考虑概率		
C_1	1.146 6	1.701 6 \times 10 ⁻⁵	2.554 1	$3.790 \ 3 imes 10^{-5}$		
C_2	0	0	0.716 0	0.163 5 $ imes$ 10 ⁻⁵		
C_3	0	0	0.676 2	5.402 8 $ imes$ 10 ⁻⁵		
C_4	0	0	0.439 6	$1.003~7 imes 10^{-5}$		
系统	1.146 6	1.701 6 $ imes$ 10 ⁻⁵	4.385 9	$1.036 imes10^{-4}$		
C_0	0	0	0.386 3	0.386 2		

同样从表 4 中可以看出,对采用本文介绍的 低电压指标排序后的事故进行风险值计算时,当 获得事故 C₂(发电机 49 故障)的风险值为 0(采用 离散型严重性函数)后,排在事故 C₂ 后的其余事 故的风险值也应该为 0,而不必对余下的事故进 行详细的风险值(离散型)计算了,这样减轻了计 算量. 这种排序对于缩短实际网较长的事故初表 更有效.

对于在事故低电压严重性排序中,排在最前

的严重断线事故 76-77,在计算系统低电压风险 时由于考虑了事故发生的可能性,其风险值 (3.7903×10^{-5}) 反而小于断线事故 69-75 的风 险值 (5.4028×10^{-5}) .所以风险值指标能全面 反映系统的严重性和可能性.

当然也可以计算某个节点承受的低电压风 险,如表 5 ~ 7 给出了部分节点在给定事故时承 受的低电压风险.

表 5 节点 53 给定事故下低电压风险值

Tab. 5 Low voltage risk of bus 53 under given contingencies

项目	离散型	连续型
C_1	0	0.133 2
C_2	0	0.299 7
C_3	0	0.133 2
C_4	0	0.186 5
系统事故	0	0.752 6
C_0	0	0.133 2

表 6 节点 76 给定事故下低电压风险值

Tab.6 Low voltage risk of bus 76 under given contingencies

	离散型	连续型
C_1	0.997 3	1.555 1
C_2	0	0.233 1
C_3	0	0.236 6
C_4	0	0.233 1
系统事故	0.997 3	2.257 9
C_0	0	0.233 1

表 7 节点 118 给定事故下低电压风险值

Tab. 7 Low voltage risk of bus 118 under given contingencies

项目	离散型	连续型
C_1	0.149 3	0.865 8
C_2	0	0.023 31
C_3	0	0.306 4
C_4	0	0.019 98
系统事故	0.149 3	1.125 5
C_0	0	0.019 98

从表 5 ~ 7 可以看出节点 76 无论在正常情况 还是在可能的事故运行下,风险值最大(连续型严 重性函数). 节点 53 在正常情况下的风险值大于 节点 118,但在事故的情况下其风险值反而小于 节点 118. 3.1.2 低电压的风险值灵敏度计算 本文以节 点 118 电压的风险值对节点 53、75、88、117、118 的有功和无功灵敏度计算为例.表 8 给出了根据 式(10) 计算的节点电压的期望值对低电压风险 值的灵敏度.

表 8 节点 118 给定事故下的低电压风险值对电 压期望值的灵敏度

Tab. 8 Low voltage risk sensitivities of bus 118 with respect to voltage mean under given contingencies

事故	灵敏度值	事故	灵敏度值
C_0	- 33.2877	C ₃	- 33.290 7
C_1	- 33.300 0	C_4	-31.5996
C_2	- 32.301 7		

根据式(11)可以获得节点118低电压风险值 对表 9、10 中几个节点的有功、无功的灵敏度.

表 9 节点 118 低电压风险值对部分控制节点 P 的灵敏度

Tab.9 Low voltage risk sensitivities of bus 118 with respect to control parameter P

事故	P_{53}	P_{75}	P_{88}	P_{117}	P_{118}
C_0	0.0027	0.132 3	0.005 6	0.006 1	0.387 6
事故(10-5)	0.018 5	0.417 0	0.067 2	0.017 5	1.707 6

表 10 节点 118 低电压风险值对部分控制节点Q 的灵敏度

Tab.10 Low voltage risk sensitivities of bus 118 with respect to control parameter Q

事故	\mathbf{Q}_{53}	\mathbf{Q}_{75}	\mathbf{Q}_{88}	Q ₁₁₇	\mathbf{Q}_{118}
C_0	0	0.358 0	0	0	1.141 2
事故(10 ⁻⁵)	0.000 2	1.469 4	0.000 3	0.0001	6.531 1

从表 9 和 10 可以看出节点 118 低电压的风险 值对自身和节点 75 的功率较为敏感. 这样根据 灵敏度的大小可以选择适当的控制措施用以减小 节点 118 的低电压风险.

3.2 系统电压稳定的风险评估

3.2.1 系统电压稳定的风险值计算 假设将负荷按比例增长至 6 668 MW 作为基态负荷,且为未来 1 h 内负荷期望值,其标准差为 2%.

表 11 给出了研究系统电压崩溃风险的事故 初表和设备的年故障率和事故概率,节点负荷有 功无功为运行参数,其标准差为 5%. 根据前文介 绍的方法进行事故筛选、排序并计算裕度.

表 11 给定事故	下 118	节点排序
-----------	-------	------

Tab. 11 R	anking an	l risk	index	of b	ous 118	under	given	contingencies
-----------	-----------	--------	-------	------	---------	-------	-------	---------------

皮里	检由化	设备年故障率(未来1h的	淡度期词(5/0/	风险值	
步写		事故发生概率 /10 ⁻⁵)	裕及期全值 / %	离散	连续
1	1-3	0.1(1.141 6)		100	100
2	8-9	0.15(1.712 3)		100	100
3	9-10	0.3(3.424 6)		100	100
4	76-77	0.13(1.484)		100	100
5	49*	0.02(0.228 3)	6.70	0.047 133	33.414
6	69-75*	0.7(7.99)	7.59	0.029 120	25.214
7	64-65*	0.2(2.2831)	7.90	0.024 280	22.517
8	100-101	0.6(6.849)	17.70	0	0
9	98-100	0.4(4.566)	18.50	0	0
10	95-96	0.1(1.141 6)	18.50	0	0
11	正常	0.999 7	18.60	0	0

表 11 给出了给定事故下的电压崩溃的风险 值,对事故后潮流不存在的事故的风险值为 100, 而对裕度百分数大于 10 的事故其风险值为零,因 此排序在断线 100-101 后面的事故的风险值也为 零,从而真正进行风险值计算的只有表中带星号 的几个,从而大大减小了计算量.表 12 则给出了 系统电压崩溃的风险值.

表 12 系统电压崩溃风险值表

Tab. 12 Voltage collapse risk index of system

皮旦	检由化	风险值			
		离散	连续		
1	1-3	0.001 142	0.001 142		
2	8-9	0.001 712	0.001 712		
3	9-10	0.003 425	0.003 425		
4	76-77	0.001 484	0.001 484		
5	49	1.076×10^{-7}	7.628 4 $ imes$ 10 ⁻⁵		
6	69-75	2.326 4 $ imes$ 10 ⁻⁶	2.014 6 $ imes$ 10 ⁻³		
7	64-65	5.543 4 $ imes$ 10 ⁻⁷	$5.140 \ 9 imes 10^{-4}$		
8	100-101	0	0		
9	98-100	0	0		
10	95-96	0	0		
11	事故	7.765 5 $ imes$ 10 ⁻³	$1.036~7 imes 10^{-2}$		
12	正常	0	0		

表 12 同样也显示了考虑事故发生概率后对 事故排序的影响,虽然给定事故下的发电机 49 停 运的风险值大于断线 69-75 和 64-65,但由于事故 发生的概率很小,其值对系统风险值的贡献反而 小.

 3.2.2 系统电压稳定的风险值灵敏度计算 这 故,缩短了事故列表,减小了风险值及其灵敏度的 里同样以系统电压稳定的风险值对节点 53、75、 计算量,提高了计算效率.并通过算例说明了该 88、117、118 的有功和无功的灵敏度的计算为例. 方法的有效性,为运行人员全面了解和分析事故 ?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 13 给出了根据式(13) 计算的电压崩溃的裕度 期望值对电压崩溃风险值的灵敏度.

表 13	给定事故下的电压崩溃风险值对裕度
	(%)期望值的灵敏度

Tab. 13 Voltage collapse risk sensitivities with respect to voltage collapse margin

事故	灵敏度值
发电机 49 停运	- 9.504 4
断线 69-75	- 8.856 8
断线 64-65	- 8.529 8

根据式(14)可以获得电压崩溃风险值对表 中几个节点的有功、无功的灵敏度.

由表 14 可以看出系统电压崩溃风险值的大 小对节点 75 和节点 118 的负荷功率较为敏感. 这 样根据灵敏度的大小可以选择适当的控制措施用 以减小系统电压崩溃风险.

表 14	电压稳定风险值对部分节点 P(Q) 灵敏度
Tab.14	Voltage collapse risk sensitivities with respect
	to control parameter $P(Q)$

事故	$P_{53}(Q_{53})$	$P_{75}(Q_{75})$	$P_{88}(Q_{88})$	$P_{117}(Q_{117})$	$P_{118}(Q_{118})$
事故(10 ⁻⁵)	1.779 3	2.375 2	1.749 5	1.492 3	2.098 0

4 结 语

本文通过在分析策略上采用一些快速的分析 方法,即分别采用针对电压崩溃和低电压的两种 CS&R(事故筛选和排序)方法对具有较长事故列 表进行分析从而快速获取风险指标不为0的事 故,缩短了事故列表,减小了风险值及其灵敏度的 计算量,提高了计算效率.并通过算例说明了该 方法的有效性,为运行人员全面了解和分析事故 的两个安全等级提供了重要的手段.

参考文献:

- [1] TAYLOR C W. Power System Voltage Stability[M]. Beijing: CEPP, 2001: 17-34
- [2] KUNDUR P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: CEPP, 2001: 959-1022
- [3] LEITE DA SILVA A M, COUTINHO I P, ZAMBRONI DE SOUZA A C, et al. Voltage collapse risk assessment [J]. Electr Power Syst Res, 2000, 54(3): 221-227
- [4] BILLINTON R, ABORESHAID S. Voltage stability considerations in composite power system reliability evaluation [J]. IEEE Trans on Power Syst, 1998, 13(2): 655-660
- [5] 陈为化,江全元,曹一家,等. 电力系统电压崩溃的风 险评估[J]. 电网技术,2005,**29**(19): 6-11
- [6] MCCALLEY J D, VITTAL V, ABI-SAMRA N, et al. Voltage risk assessment [C] // Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton: [s n], 1999
- [7] WAN Hua, MCCALLEY J D, VITTAL V. Risk based voltage security assessment [J]. IEEE Trans on Power Syst, 2000, 15(4): 1247-1254
- [8] 李生虎,丁 明,汪兴强. 电力系统静态电压安全问 题的概率评价[J]. 电力系统自动化,2003,27(20): 26-30
- [9] MCCALLEY J D, VITTAL V, ABI-SAMRA N. An overview of risk based security assessment [C] // Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton: [s n],1991
- [10] 陆 波, 唐国庆. 基于风险的安全评估方法在电力 系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2000, **24**(2): 61-64

- [11] NI Ming , MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. Online risk-based security assessment [J]. IEEE Trans on Power Syst, 2003, 18(1): 258-265
- [12] NI Ming, MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. Software implementation of online risk-based security assessment [J]. IEEE Trans on Power Syst, 2003, 18(3): 1165-1172
- [13] PENG Yu, SUN Hui, ZOU Ji-yan, et al. Improved method based on second order loss sensitivity for voltage collapse [C] // The International Conference on Electrical Engineering. Kunming: [s n], 2005:SS2-07 ICEE-C0277
- [14] POSHTAN M, RASTGOUFARD P, SINGH B. Contingency ranking for voltage stability analysis large-scale power systems [C] // Power System Conference and Exposition. PES, Vol. 3. Piscataway: IEEE, 2004: 1506-1513
- [15] CHIANG Hsiao-dong, FLUECK A J, SHAH K S, et al. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations [J]. IEEE Trans on Power Syst, 1995, 10(2):623-634
- [16] BERIZZI A, FINAZZI P. First and second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement [J]. IEEE Trans on Power Syst, 1998, 13(2): 543-551
- [17] WEI Hua, SASAKI H. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure [C] // IEEE/PICA. Columbus: IEEE, 1997: 134-141
- [18] SINGH S N, SRIVASTAVA S C. Improved voltage and reactive power distribution factors for outage studies [J]. IEEE Trans on Power Syst, 1997, 12(3): 1085-1093

Voltage security assessment for on-line risk index and its sensitivity

PENG Yu, ZHOU Wei, SUN Hui*, ZOU Ji-yan

(Dept. of Electr. and Electr. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract: A more suitable way to economize computational time for risk index and its sensitivity calculation is presented, and then the efficiency from the analytic perspective is enhanced. For example, the CS & R (contingency screening and ranking) methods for low voltage and voltage collapse are applied to quickly detect the non-zero risk contingency, and the second order loss sensitivity index is adopted to take the place of CPF (continuation power flow) to determine the expected value of the loadability. The risk sensitivity calculation is also carried out to provide the useful information for the selection of preventive and corrective action to mitigate the security problem. And a full framework of risk-based voltage security assessment is proposed to give a more clear understanding about this subject. Case study with IEEE118-bus system is carried out and the conclusion can be drawn that the integrity assessment for risk-based voltage security proposed presents quick and accurate advantages and is very suitable for online analysis.

Key words: voltage security; risk index; risk sensitivity; second order loss sensitivity index; CS&R ?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net