

# 基于事故树分析法的电力系统事故链监控研究

宋福龙, 罗毅, 涂光瑜, 罗金山

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 电力系统大面积停电事故一般是由并发连锁事件的复杂序列引起, 如果在事故前建立系统事故失效模型, 分析出造成系统失效的连锁事件序列, 对混杂大系统的事故监控具有重大的指导意义。该文依据电力系统事故链监控理论, 通过事故树分析方法建立电力系统事故失效模型, 并以该模型的定性分析为基础得到系统失效事故链; 定量分析了电力系统典型对称辐射网、不同负荷分布的环网结构的系统失效事故链; 最后以新英格兰 10机 39节点系统为系统分析实例, 进一步验证了事故树分析法的电力系统事故链监控的可行性和有效性。

**关键词:** 事故树分析法; 事故链; 电力系统安全

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)02-0029-06

## 0 引言

随着电力系统的市场化和大区互联, 系统在空间上广域分布, 扰动传播的范围大, 而各区域的安全强度不同、互见性差, 局部事故通过电网迅速传播和扩大, 从而引发连锁性事故而导致系统崩溃。传统的电力系统安全性研究主要针对单一事故, 停留在故障级, 而并发的连锁事故序列反映了系统事故发生的过程, 是系统崩溃的轨迹。当前的安全监控系统忽视了事故影响因素间的影响和事故的并发连锁机理, 仅仅实现了系统的部分安全状态变量的监控, 而没有实施对连锁事故序列的监控和系统安全决策的内容。因此, 在电力系统事故前建立事故失效模型, 对连锁事故序列进行事故链分析, 对电力系统的安全监控具有重大的意义。

最近, 国内外学者对电力系统安全问题进行了深入的探索, 文献 [1] 从分析影响电力系统安全性的各种因素出发, 提出了电力系统安全新框架, 考虑人和自然环境气候等外部因素的影响; 文献 [2~5] 引入风险理论, 扩展了电力系统脆弱性的概念。文献 [6~8] 应用事故树分析法 (FTA), 建立了系统设备和变电站通信系统失效模型。

本文针对电力系统事故的并发故障序列, 引入安全科学中“事故链”的概念, 应用事故树分析方法建立电力系统事故失效模型, 并依据其定性和定量分析方法建立了电力系统事故链理论。文中分析了电力系统典型的辐射对称网络和负荷分布变化的环网网络结构, 最后以新英格兰 10机 39节点系统为

系统分析实例, 建立了系统供电失效模型, 并分析了不同负荷要求下系统事故链的变化和监控重点的变化, 进一步验证了基于事故树分析法的电力系统事故链监控理论的有效性。

## 1 基于事故树分析法的事事故链监控理论

### 1.1 事故树分析理论

事故树分析 (Fault Tree Analysis, FTA) 是研究引起系统发生故障这一事件的各种直接的或间接的原因 (例如元件、软件、环境和人为因素等), 根据先后次序和因果关系等建立逻辑关系, 并用逻辑框图 (即故事树) 表示的一种方法<sup>[6]</sup>。

事故树分析 (FTA) 目前有定性分析和定量分析两种方法。定性分析就是找出导致顶事件发生的所有可能的故障模式, 即求出故障树的所有最小割集。根据已求出的最小割集, 即使在基本故障事件的概率规律及原始数据不十分清楚的情况下也能判定系统可靠性最薄弱的环节和比较不同系统的可靠性程度。

故障树的定量分析方法<sup>[9]</sup>为: 一是输入系统各单元的失效概率求出系统的失效概率; 二是求出各单元的结构重要度、概率重要度。由各单元的失效概率求系统的失效概率方法为: 设系统有  $n$  个最小割集, 分别为  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , 则系统失效的顶事件  $T$  的概率  $P(T)$  为:

$$P(T) = p(E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_n) \quad (1)$$

求系统各单元结构重要度计算公式如下:

$$I_{st}(j) = \frac{1}{2^{n-1}} n_j \quad (2)$$

式中:  $I_{st}(j)$  为第  $j$  个单元的结构重要度;  $n$  为系统全部单元(底事件)的个数;  $n_j$  为将  $j$  个单元分别加入  $2^{n-1}$  个组合中使之从非割集变成割集的组合总数。

求系统单元的概率重要度计算公式如下:

$$I_{pr}(j) = \frac{\partial Q}{\partial q_j} \quad (3)$$

式中:  $I_{pr}(j)$  为第  $j$  个单元的概率重要度;  $Q$  为系统失效概率 ( $P(T)$ );  $q_j$  为第  $j$  个单元的失效概率。

### 1.2 电力系统事故链监控思想

“事故链”是安全科学提出的概念,即“大事故极少是由一个原因引起的,而是由许多因素像链条一样,把各个环节连接在一起时发生的”。电力系统大面积停电事故的发生也非单一故障所致,而是并发事故影响因素序列的连锁效应。因此,结合事故链的概念和事故树分析理论,建立电力系统事故链监控理论,即:基于事故树分析法建立系统事故模型,采用定性分析得到系统失效事故链,并利用系统事故的概率数据进行各种定性分析,得到事故链监控的优先级和事故的重要影响因素。

首先,依据经典的事故树分析理论和电力系统的系统结构建立系统失效的事故树分析模型。由于 FAT 的定性分析能分析出导致系统失效的所有失效模式,所以依据 FAT 建立电力系统失效模型,并进行定性分析,得出的每个最小割集就是一个系统级事故链,该事故链引发的是电力系统级事故(即安全科学定义的设备事故)。

其次在事故失效事故树模型中,事故的影响因素作为各个事故树的基本底事件,底事件的选取尽量选择表征电网系统级事故的特征变化或异常的底事件。例如,功角稳定的底事件尽可能采用功角量、电压相角差等描述;低频振荡问题的底事件尽可能采用功率量、电压幅值、振荡频率等量来描述。顶事件的确定主要按照国家电网公司《电业安全事故调查规程》的规定,属于电力系统的系统级事故主要是指由于设备的异常运行或被迫停止运行引起对用户的少送电、稳定破坏或系统瓦解。

最后依据所建立的系统失效模型的事故链进行定性和定量分析。采用富塞尔法(行列法)<sup>[10]</sup>对系统失效模型定性分析求出失效事故链集合,即:

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n\} \quad (4)$$

$$L_i = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{im_i}\} \quad (5)$$

式中:  $T_{ij}$  为第  $i$  条事故链的第  $j$  个条件,  $j=1, 2, \dots, m_i$ 。

第  $i$  条事故链  $L_i$  涉及的事故影响因素的集合

$$V_i = \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{i k_i}\} \quad (6)$$

根据式(1),采用改进的近似区间法<sup>[9]</sup>,求顶上事故发生的概率  $Q_T$ ,即满足概率精度又加快了计算速度。

$$Q_T = \sum_{r=1}^k \prod_{x_i \in K_r} q_i + \sum_{1 \leq r < s} \prod_{x_i \in K_r, K_s} q_i + \dots + (-1)^{k-1} \prod_{x_i \in K_1} q_i$$

$$\begin{aligned} \text{设: } & \sum_{r=1}^k \prod_{x_i \in K_r} q_i = F_1 \\ & \sum_{1 \leq r < s} \prod_{x_i \in K_r, K_s} q_i = F_2 \\ & \dots \\ & \prod_{x_i \in K_1} q_i = F_k \end{aligned}$$

$$\text{则: } Q_T = F_1 - F_2 + \dots + (-1)^{k-1} F_k \quad (7)$$

其中:  $r$  为事故链的序数,  $k$  为事故链的个数,  $q$  为事故链事件的故障率。

再根据式(2)、(3)和(7)求  $L_i$  的概率重要度  $I_{pr}(L_i)$  和底事件  $V_i$  的结构重要度  $I_{st}(V_i)$ 。通过比较各个事故链的  $I_{pr}$ , 确定每个事故链的优先级,同时比较各事故链的底事件的  $I_{st}$  值, 确定事故链内部的事件监控的优先级。

## 2 电力系统典型网络事故链分析

### 2.1 变电站对称辐射网事故链分析

选取典型的变电站系统进行分析,参照文献[6]系统接线图,如图1所示。

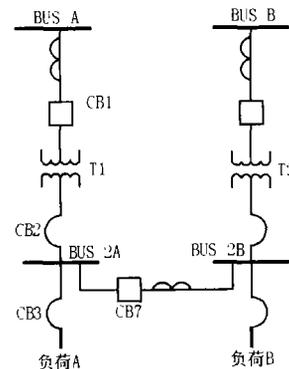


图1 典型变电站单元接线图

Fig 1 Single-line diagram of typical substation

针对该变电站的服务失效模型,即母线 A、B 失压用负荷事故模型。造成 A、B 母线失压的因素可能为母线 2A、2B 故障没有隔离,断路器 CB7 短路或

者母线 2A/B 失去有功,然后分别对各个事故影响因素进行分析。对事故影响因素分析得越详细,服务失效事故树对事故机制的表达就越精确。

根据文献 [6]附录 A 列出的引起变电站服务失效事故的所有可能故障,确定变电站事故树的顶上事件为母线 A、B 服务失效,即变电站供电失效。然后建立变电站服务失效故障树逻辑图如图 2 所示。

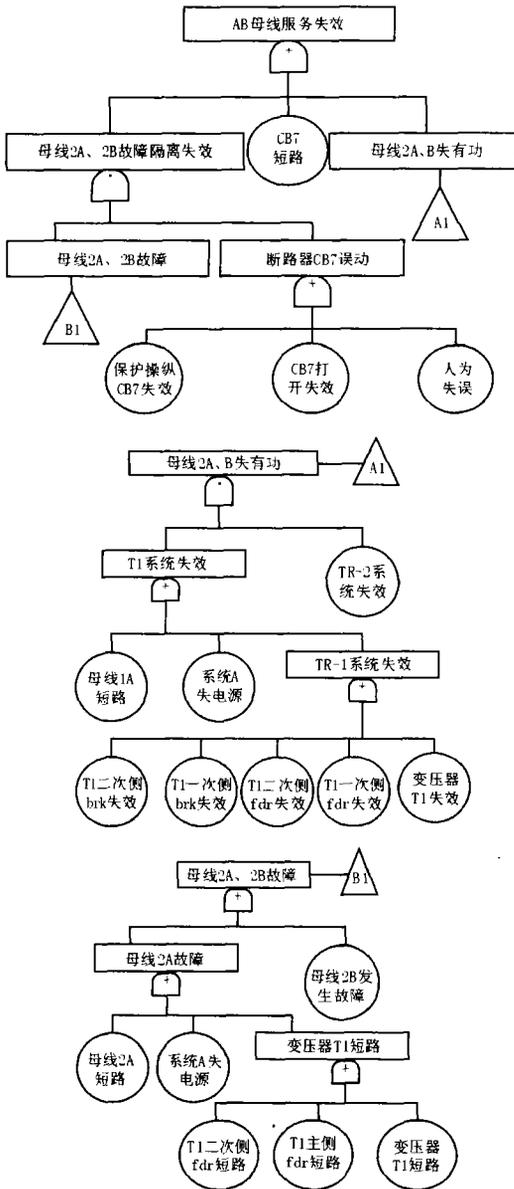


图 2 变电站服务失效模型逻辑图

Fig 2 Logic diagram of substation service disabled model

2.1.1 变电站供电失效事故模型的定量分析和定性分析

依据本节建立的事故树,从顶上事件到基本事件,从左到右进行编号,顶上事件为 Y,各基本事件

分别为  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{26}$ ,由事故树的逻辑结构可得:

$$\begin{aligned}
 Y &= X_1 + X_2 + X_3 = X_4 \cdot X_5 + X_2 + X_6 \cdot X_7 = \\
 &= (X_8 + X_9) \cdot X_5 + X_2 + (X_{13} + X_{14} + X_{15}) \cdot \\
 &X_7 = (X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_9) X_5 + X_2 + (X_{19} + \\
 &X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{14} + X_{15}) X_7 = \\
 &(X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_9) (X_{10} + X_{11} + X_{12}) + \\
 &X_2 + (X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{14} + \\
 &X_{15}) X_7 = (X_{16} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{18} + \\
 &X_9) (X_{10} + X_{11} + X_{12}) + X_2 + (X_{19} + X_{20} + \\
 &X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{14} + X_{15}) X_7
 \end{aligned}$$

对 Y 的表达式进行化简得到:

$$\begin{aligned}
 Y &= (X_{16} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{18} + X_9) X_{10} + \\
 &(X_{16} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{18} + X_9) X_{11} + \\
 &(X_{16} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{18} + X_9) X_{12} + X_2 + \\
 &(X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{14} + X_{15}) X_7
 \end{aligned}$$

简化后的 Y 表达式就是变电站服务失效事故链。根据文献 [6]计算得到的基本事件的故障概率,按照式 (3),对各个事故链进行概率计算和概率重要度分析,分析结果如表 1。

表 1 变电站服务失效事故链概率重要度

Tab 1 Probability degree of substation service disabled fault chains

事故链	概率重要度	事故链	概率重要度
$X_{10}X_{16}$	4.834/0.0022	$X_7X_{15}$	149.1/0.066
$X_{10}X_{24}$	1.477/0.0006	$X_7X_{14}$	300.2/0.133
$X_{10}X_{25}$	7.485/0.0033	$X_2$	6.565/0.003
$X_{10}X_{26}$	10.063/0.0044	$X_7X_{19}$	171.4/0.076
$X_{10}X_{18}$	190.4e/0.0844	$X_7X_{20}$	171.4/0.076
$X_{10}X_9$	213.2e/0.0945	$X_7X_{21}$	11.57/0.005
$X_{11}X_{16}$	0.158/0.00001	$X_7X_{22}$	586.1/0.259
$X_{11}X_{24}$	0.607/0.00027	$X_7X_{23}$	7.878/0.349
$X_{11}X_{25}$	3.077/0.0014	$X_{11}X_{18}$	96.72/0.043
$X_{11}X_{26}$	4.134/0.0018	$X_{11}X_9$	87.61/0.039

表 1 中事故链事故概率的单位为  $10^{-14}$ ,由于无法获得人因事故概率,所以本文暂未考虑人因割集。

为了度量复杂系统由于某个子系统(或元件)的失效而导致整个系统的失效的程度,本文引入系统失效激发度  $\mu^{[7]}$ ,对概率重要度  $a > \mu$  的事故链,应该重点监控。

根据表 1 列出的事故链概率重要度 a,取系统失效激发度  $\mu = 0.05$ ,如图 3 所示。依据图 3,得到重点监控的事故链  $\{X_9, X_{10}\}, \{X_{10}, X_{18}\}, \{X_7, X_{19}\}, \{X_7, X_{20}\}, \{X_7, X_{22}\}, \{X_7, X_{23}\}, \{X_7, X_{14}\}, \{X_7, X_{15}\}$ 。

为了比较事故链中各个事件监控的优先权,对

事故链进行结构重要度分析,按照式(2)得到各个基本事件的结构重要度,如表2所示。

对重点监控的事故链编号  $I$  ( $I$  的值为  $1 \sim 8$ ), 假设系统有并发故障序列  $X_7, X_{10}$  发生时,我们必须对  $1 \sim 8$  事故链进行监控,根据式(6)求得  $T(L_i)$  是相等的,再按照表1和表2,对事故链进行优先权 ( $I$ ) 进行排序:  $(1) > (2) > (6) > (5) > (7) > (3) = (4) > (8)$ 。根据上述的排序情况,监控就变的清晰而有序。

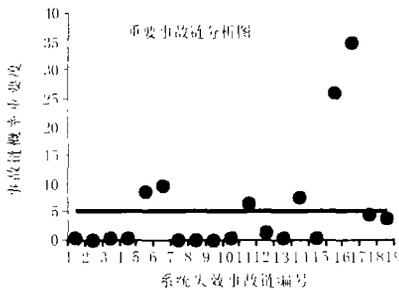


图3 重要事故链分析图

Fig 3 Analysis diagram of significant fault chains

表2 变电站服务失效事故链结构重要度

Tab 1 Structure degree of substation service disabled fault chains

事件	结构重要度 / (%)	事件	结构重要度 / (%)
$X_7$	0.175	$X_9$	0.05
$X_{10}$	0.15	$X_{11}$	0.05
$X_2$	0.05	$X_{16}$	0.05
$X_{24}$	0.05	$X_{25}$	0.05
$X_{26}$	0.05	$X_{18}$	0.05
$X_{15}$	0.025	$X_{14}$	0.025
$X_{19}$	0.025	$X_{20}$	0.025
$X_{21}$	0.025	$X_{22}$	0.025
$X_{23}$	0.025	-	-

### 2.2 考虑负荷分布的电力系统环网供电失效事故链分析

环网的可靠性高于辐射网和对称辐射网,同时环网供电可靠性对环网内负荷的分布更加敏感。分别选取负荷分布和负荷集中两种环网结构进行事故链分析,从分析的结果观察负荷分布对网络结构重要度的影响,从而验证事故链思想。

#### 2.2.1 两种典型环网事故链分析

两个典型环网如图4和图5所示,前者是负荷集中分布,后者是负荷分散分布。

根据事故树分析步骤对典型环网(a)分析得到该网络的供电失效模型的最小割集  $Y_a$ :

$$Y_a = 4 + 3 + L_{41}L_{34} + L_{23}L_{34} + 1L_{34} + 2L_{34} + G_1L_{12}L_{34} + G_2L_{12}L_{34} + G_1G_2 + L_{41}L_{23} +$$

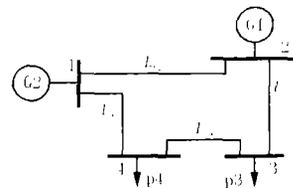


图4 负荷集中环网接线图

Fig 4 Single-line diagram of centralized load loop net

$$1L_{23} + 2L_{41} + G_1L_{12}L_{23} + G_2L_{12}L_{41} + 2 \times 1 + 1G_2L_{12} + 2G_2 + 1G_2L_{41}$$

网络结构各点的结构重要度  $\phi[I](i)$  ( $I$  为底事件,  $i$  为底事件的结构重要度值) 依次排序:

$$\phi[1, 2](0.35), a[L_{12}](0.3333),$$

$$\phi[G_1, G_2, L_{41}, L_{23}](0.30),$$

$$\phi[L_{34}](0.2667), a[3, 4](0.1).$$

对图5典型环网(b)进行事故树分析得到该网络的供电失效模型的事故链  $Y_b$ :

$$Y_b = 4 + 2 + L_{41}L_{34} + L_{12}L_{23} + 1L_{34} + 3L_{23} + G_1L_{12}L_{34} + G_3L_{41}L_{23} + G_1L_{23}L_{34} + G_3L_{34}L_{23} + G_1G_3 + 3G_1 + 1G_3 + G_3L_{41}L_{23} + G_1L_{12}L_{34} + L_{12}G_3L_{41} + L_{41}G_1L_{12}$$

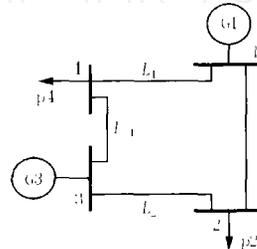


图5 负荷分布环网接线图

Fig 5 Single-line diagram of distributing load loop net

网络结构各点的结构重要度  $\phi[I](i)$  ( $I$  为底事件,  $i$  为底事件的结构重要度值) 依次排序:

$$\phi[G_1, G_2, L_{34}, L_{23}](0.2333),$$

$$\phi[L_{41}, L_{12}](0.1833),$$

$$\phi[1, 2, 3, 4](0.1).$$

从两种网络结构的结构重要度分析的结果,可以看出:随着负荷分布的变化,环网的基本设备的结构重要度随之发生转移,相同的环网结构不同的负荷分布,监控的重点也随之发生变化。在系统分析实例中将详细比较负荷变化对系统结构的影响。

### 3 系统分析实例

将新英格兰10机39节点系统简化,如图5所示。系统建模暂不考虑稳定性问题,根据系统的重负荷集中于、和三点,根据网络结构,选取39

和 16号母线失效作为新英格兰 10机 39节点系统供电失效模型的顶事件。各个事故影响因素只考虑线路和各个点失效。

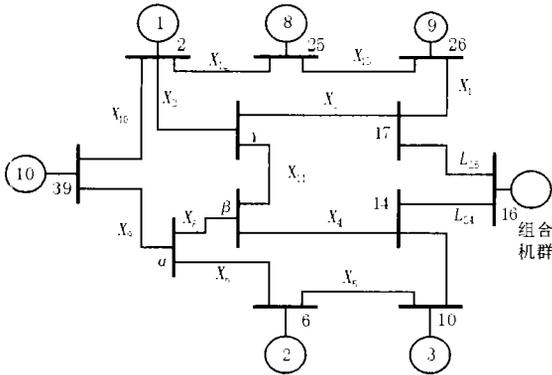


图 6 简化的新英格兰系统单线图

Fig 6 Single-line diagram of simplified New England system

通过事故树分析供电失效模型得到该模型的事故链 Y,限于篇幅,略去系统失效模型的建立和事故链的简化过程没列出,只列出事故链及其定量分析的结构重要度如表 3所示。

表 3 系统失效事故链事件结构重要度

Tab 3 Structure degree of system disabled fault chains' events

事件	结构重要度 / (%)	事件	结构重要度 / (%)
X <sub>1</sub>	0.128 67	L <sub>24</sub>	0.171 38
X <sub>2</sub>	0.085 33	L <sub>25</sub>	0.168 19
X <sub>3</sub>	0.104 00	14	0.114 67
X <sub>4</sub>	0.110 00	10	0.172 36
X <sub>5</sub>	0.080 22		0.070 83
X <sub>6</sub>	0.151 33		0.054 16
X <sub>7</sub>	0.098 86		0.010 00
X <sub>8</sub>	0.127 83	26	0.161 00
X <sub>9</sub>	0.010 00	2	0.010 00
X <sub>10</sub>	0.010 00	25	0.141 53
X <sub>11</sub>	0.085 33	17	0.092 00
X <sub>12</sub>	0.082 55	16	0.138 86
39	0.203 04	6	0.104 67

$$Y = (25X_3X_4 + 25 \times 17X_4 + 25 \times 26X_4L_{25} + 25 \times 26 \times 16X_4 + 25L_{25}X_1X_4 + X_1X_4 \times 25 \times 16 + X_3X_4X_{12} + 17X_4X_{12} + 26L_{25}X_4X_{12} + 25 \times 14 \times 26 \times 16 + 25 \times 14X_1L_{25} + 14 \times 25 \times 16X_1 + 14X_3X_{12} + 14 \times 17X_{12} + 14 \times 26X_{12}L_{25} + 14 \times 16 \times 26X_{12} + 14X_1X_{12}L_{25} + 14 \times 16X_{12}X_4 + 10 \times 25L_{24}X_3 + 10 \times 25 \times 17L_{24} + 10 \times 25 \times 26L_{24}L_{25} + 10 \times 16 \times 25 \times 26L_{24} + 10 \times 25X_1L_{24}L_{25} + X_1X_7X_{12}L_{24}L_{25} + 16X_1X_7X_{12}L_{24} + 10 \times 26X_2X_3) \times (X_8 + 39 \times X_6 + 39 \times 6) + X_9 + y + X_6X_8 + X_6 \times \beta + X_8 \times 6 + 6 \times \beta + (X_4X_6 + 14X_6 + 16X_6X_7 + X_6X_7L_{24} + 10X_6L_{24} + 6X_4 + 6 \times 14 + 6 \times 16X_7 + 6X_7L_{24} + 6 \times 10 \times 16 + 10 \times 6L_{24}) (X_{11} + a + 17X_2 + 26X_2L_{25})$$

当系统的供电模式发生变化时,系统线路和设备的结构重要度也随负荷分布的变化而变化,图 7对比了一类负荷转移到 14和 17点时,事故链底事件的要度的变化情况。

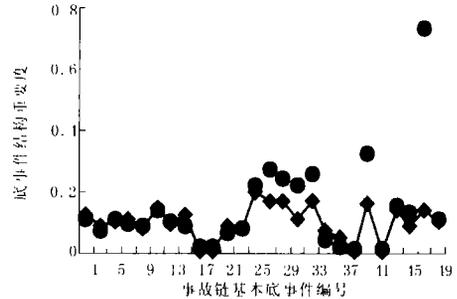


图 7 不同负荷要求下结构重要度对比图

Fig 7 Comparison diagram of structure degree of different bads

从图 7我们可以清楚的看到,当负荷转移后 26点和 16点的结构重要度增加了,在包含这两个基事件事故链就升迁为监控重点。

#### 4 结论

引入安全科学中“事故链”的概念,依据事故树分析理论建立的电力系统事故链监控理论,能在事故前分析造成系统事故的故障序列,有效地克服了事故监控的盲目性,在此基础上的事故链定量分析结论为调度人员提供了不同优先级别的监控方案和重要事故影响因素。文中以大量的实例论证了基于事故树分析法的电力系统事故链监控思想正确性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] 韩祯祥. 电力系统的安全性及防治措施 [A]. 电力系统安全及其战略防御高级学术研讨会. 2004.  
HAN Zhen-xiang The Security and Preventive of Electric Power System [A]. Senior Science Proseminar of Electric Power System Security and Its Preventive 2004.
- [2] HUA Wan, McCalley J D, Vittal V, et al Risk Based Voltage Security Assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (4).
- [3] MNG Ni, McCalley J D, Vittal V, et al Online Risk-based Security Assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (1): 258-265.
- [4] MNG Ni, McCalley J D, Vittal V, et al Software Implementation of Online Risk-based Security Assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (3): 1165-1172.
- [5] McCalley J D, Fouad A A, Vittal V, et al A Risk-based Security Index for Determining Operating Limits in Stability-limited Electric Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 12 (3):

- 1210-1219.
- [6] Richard B, Robert A. Analyzing Reliability, a Simple Yet Rigorous Approach [Z].
- [7] 刘娜,高文胜,谈克雄,等.大型电力变压器的故障树的构建及分析[J].中国电力,2003,34(2):33-36.  
LU Na, GAO Wen-sheng, TAN Ke-xiong, et al. The Establishment and Analysis of Fault Tree for Huge Electric Power Transform [J]. Electric Power, 2003, 34(2): 33-36.
- [8] 韩小涛,尹项根,张哲.故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J].电网技术,2004,28(1):56-67.  
HAN Xiao-tao, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. The Application of FTA for the Reliability Analysis of Substation Communication System [J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 56-57.
- [9] LU Lan. Safety Engineering[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2003.
- [10] 罗毅.电力系统安全监控的理论及方法研究(博士学位论文)[D].武汉:华中科技大学,2004.  
LUO Yi. An Investigation on Theory and Method of Security Monitoring of the Power System, Doctoral Dissertation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

收稿日期: 2005-06-01; 修回日期: 2005-06-22

作者简介:

宋福龙(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统事故监控、故障诊断研究;E-mail: sfl825@163.com

罗毅(1966-),男,副教授,从事EMS和DMS的研究;

涂光瑜(1941-),男,教授,博导,长期从事电力系统运行与控制研究。

### FTA-based fault chains monitoring research in power system

SONG Fu-long, LUO Yi, TU Guang-yu, LUO Jin-shan

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The large-area blackout in power system is caused by complex and consistent fault sequences. It is very important in complex power system fault monitoring if establishing the fault model and analyzing the fault sequences result in faults before the occurrence of faults. According to the theory of fault chains monitoring and the method of FTA, this paper establishes power system fault model. Based on the model of qualitative analysis, fault chains of the disabled system is obtained. The power system typical radiant net fault chains and loop net fault chains are quantitatively analyzed. Finally, it takes the New England system as an example to test the theory is available and accurate.

**Key words:** FTA; fault chains; power system security

(上接第 23 页 continued from page 23)

收稿日期: 2005-06-10

作者简介:

童强(1974-),男,硕士研究生,研究方向为FACTS方面的分

析计算及电力电子在电力系统中的应用;E-mail: tonghongqiang@sina.com

彭建春(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场研究及优化运行和智能控制。

### A novel method for power flow calculation of power system with UPFC

TONG Qiang, PENG Jian-chun

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** A new and versatile power injection model for the unified power flow controller (UPFC) is presented in this paper. Based on the model, the load flow equations of power system in which the UPFCs are embedded and derived. The new algorithm is developed based on the fast decoupled load flow (FDLF). In the method, Jacobian matrix keeps constant during the iterative process and two sequential iterative process are required. In addition, to retain the basic properties of the FDLF technique, the method provides comparatively good initial conditions of UPFC control variables directly and simply. The numerical examples indicate that the proposed algorithm is reliable, efficient and accurate.

**Key words:** UPFC; FACTS; load flow calculation; FDLF; power injection model