

# 基于随机 Petri网模型的地区电网事故链监控研究

罗金山,罗毅,涂光瑜,宋福龙

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:** 地区电网事故一般是由多重并发故障的复杂序列引起的。如果能在事故前建立系统事故链模型,分析出造成系统事故的复杂事件序列,将有利于对电力系统事故进行监控。该文提出了基于随机 Petri网 (SPN) 建立地区电网事故链模型的新方法,设计了一种快速动态搜索算法,根据负荷和结构的变化快速求取地区电网事故链,并根据定量分析确定需要重点监控的危险事故链,在此基础上设计了针对地区电网事故影响因素的预控算法。最后对某地区电网进行了实例分析,结果表明该方法具有有效性和正确性。

**关键词:** 事故链; 随机 Petri网; 安全监控; 预防控制

**中图分类号:** TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)07-0032-06

## 0 引言

随着供电负荷的持续增长,电源性缺电的局面依然存在,电网运行的压力越来越大,导致一二类负荷停电的地区电网事故时有发生。这些事故严重地影响了人们的生产生活和经济发展,并造成巨大的经济损失和社会影响。因此,研究如何减少地区电网事故并从本质上对事故进行实时控制,对系统安全运行和可靠供电越来越迫切而至关重要。传统减少电网事故的措施主要有:加强主要地区的电网结构、改进电网设备的设计制造、加强维护检修、提高运行人员素质等方面,而并未从本质上对电网事故监控进行研究分析<sup>[1,2]</sup>。而电网事故通常都是多起事件的复杂序列引起的,这些事件包括一次或二次设备故障、自然灾害(雷电、台风、风雪等)、工作人员失误等,要有效地抑制电网事故的发生,就必须寻找和监控引发事故的复杂事件序列。另一方面,正在现场运行的监控系统仅仅实现了对设备和系统的部分安全状态变量的监控,缺乏对引发电网事故的事件序列的监控和相应的电力系统安全决策<sup>[3]</sup>。可见,研究如何动态监控地区电网事故链对避免系统事故的发生意义重大。

多年来,国内外学者在电力系统安全研究方面做了很多工作,其中的一些工作对研究电力系统的事故链具有一定的作用。文献[4]利用随机 Petri网 SPN (Stochastic Petri nets)模拟电力系统可靠性影响因素间复杂的相互作用,并以分布式发电系统为例建立模型,利用 SPN 与马尔可夫链 MC (Markov Chain)同构的思想进行了系统的分析,从可靠性的角度建立了事故分析的元件模型,但并未提出解决

办法和控制方式<sup>[4]</sup>。在电力系统故障诊断和系统恢复的研究中引入了 Petri网的扩展模型,如分级时间扩展 Petri网、模糊 Petri网、编码 Petri网、着色 Petri网、分层 Petri网等,为采用 Petri网建立电力系统事故链模型奠定了坚实的基础<sup>[5-10]</sup>。

本文将在现有研究的基础上,结合现代安全科学理论和“事故综合原因论”,对电力系统事故链进行深入的研究。研究的基本思想是:首先采用随机 Petri网建立地区电网事故链模型,研究快速求取地区电网事故链的方法;然后分析如何动态监控地区电网的事故链,在事故发生之前,设法抽调事故链的一个或多个环节,切断事故链或采取控制方法避免事故的扩大。

## 1 利用 SPN 建立事故链模型

所谓电力系统事故链,是指把电力系统事故看成是由许多影响因素共同促成的,这些因素像链条一样把事故的各个环节连接在一起。研究电力系统事故链,首先要求建立事故链模型。事故链的各个环节具有离散性质,可以作为离散系统处理。随机 Petri网 (SPN)非常适合用于离散系统的建模分析,能够提供动态的、图形的、准确的形式描述。因此,可以采用 SPN 建立电力系统事故链模型。

### 1.1 基于带控制单元的 SPN 模型

带控制功能的 SPN是标准 P/N模型<sup>[11]</sup>的一种扩展,定义为  $\gamma$ 元组  $G = (P, T, F, W, U, M_0, \gamma)$ ,其中  $(P, T, F, W, M_0)$ 为标准 P/T系统, P元素表示位置, T元素表示变迁, F元素表示有向弧, W表示弧权函数, U为有限控制位置集,  $\gamma_i$ 为 Token在状态位置中的时延(对应本文的位置 Token转移权重),  $M_0$

对应由  $P$ 组成的初始状态。控制集  $U$ 主要是对可控的基本位置事件进行控制,使系统向着正常的方向发展。控制集  $U$ 的求取主要根据事故链的特征,计算避免不希望发生事件路径的集合。假设系统每一变迁的实施服从一指数分布函数:

$$\forall t \in T: F_t = 1 - e^{-t/x} \quad (1)$$

其中:  $t$ 为任一变迁,  $F_t$ 表示分部函数,  $x$ 为一连续随机变量,  $x > 0$ 。

在确立地区电网事故链模型的过程中,从可靠性理论得出变迁实施的分布函数。通过对设备或系统的历史数据进行统计分析得出发生故障的数学期望值  $\mu$ ,求出系数  $l_t$ (指数分布数学期望  $\mu = 1/l_t$ ),进而确定变迁的概率分布。

任何具有有穷个位置和变迁的 SPN 同构于一个马尔可夫链 (MC),则  $t_i$ 实施的概率为:

$$P(M_{i_j}) = \frac{t_i}{\sum_k t_k} \quad (2)$$

其中:  $t_i$ 为实施变迁  $t_i$ 的平均实施权数。

为了进行系统性能分析,需要求取 MC 的稳定状态概率。定义转移矩阵  $Q = [q_{ij}]$ ,  $q_{ij}$ 表示状态  $M_i$ 到  $M_j$ 变迁弧上的权数,若状态  $M_i$ 到  $M_j$ 的变迁无法实现,则  $q_{ij} = 0$ 。根据 MC 过程有下列方程组:

$$\begin{aligned} XQ &= 0 \\ \sum_i x_i &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

状态平衡方程:

$$\left( \sum_j x_j \right) x_i = \sum_k (x_k x_k) \quad (4)$$

结合方程 (3)和 (4)即可求出每个标志的稳定状态概率。利用稳定状态概率可以进行系统性能分析,如 Token在状态  $M$ 下的稳定时间、Token概率密度函数等。

由于地区电网的事故链模型是一个复杂、大型的模型,在使用随机 Petri网对地区电网的事故链进行建模时,可以采用简化和合并的方法。简化模型方法可以建立起层次结构化的网模型,子模型的合并可以使简单的子系统集成为复杂的整个系统。

### 1.2 地区电网事故链的 SPN 模型

为简化分析,电网的所有元件均采用统一模型。各元件建立子 SPN 模型(离散型变量和连续型变量的混合模型),考虑连续型变量对模型的影响,进行混合系统的分析<sup>[12]</sup>。SPN 的状态实时跟踪设备和变量的真实值,达到实时事故预控。在事故发生前给出预警。根据地区电网一次主接线,以变压器事故、母线/线路事故、线路事故和人因失误分别进行各单元建模分析。

#### (1) 母线/线路的简化 SPN 模型

如图 1 为变电站某一段线路或母线事故对应的简化 Petri网模型。线路短路或者故障后,首先变迁  $T_1$ 触发,继电器  $R$ 动作控制相应断路器  $CB$ 动作。当断路器  $CB$ 失效或者继电器  $R$ 失效,则该段馈线失效,位置中的 Token 也存在于线路失效事件  $SL$ 中。

每一段线路和母线对应一组 Petri网模型,位置和变迁根据具体情况作相应变化。变迁分为两种,瞬时变迁和呈指数概率分布变迁。变迁  $T_1, T_2$ 为呈指数概率分布的变迁,表示母线或线路发生事故的时间概率服从指数分布,  $T_3$ 为瞬时变迁,表示  $R$ 正常,  $CB$ 迅速动作。

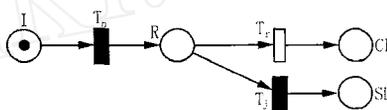


图 1 线路简化 SPN 模型

Fig 1 Simplified Petri network of circuit

#### (2) 变压器的 SPN 模型

图 2 中,位置事件  $P_1 \sim P_n$ 表示与变压器有关的基本位置事件,如过热故障、介质损耗、铁心层间短路、电弧放电和油温过高等。由这些基本事件导致了局部故障,如控制不当或者自愈能力差,变迁  $T_1$ 触发,继电器  $R_s$ 动作。继电器  $R_s$ 动作控制相应断路器  $CB$ 动作,瞬时变迁  $T_2$ 发生。如果情况恶化,  $T_3$ 发生,变压器失效  $S_1$ 动作。

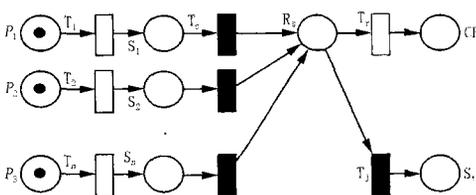


图 2 变压器简化 Petri网

Fig 2 Simplified Petri network of transformer

#### (3) 人因的 SPN 模型

人因位置事件可以在很多人可以影响的位置状态出现,主要由可能的误操作导致的设备不正常状态或事故。影响变电站人员事故处理能力的因素主要有:值班长的事故处理指挥领导能力,班组的整体水平,值班质量,执行规程程度和有效的安全监控系统(包括事故预想)。人因影响的量化问题是以后研究的方向,本文将人因变迁的引发和输入输出的概率暂由常量代替。

#### 1.3 利用快速动态搜索算法求事故链

由于地区电网的结构和负荷的变化,事故链模

型是变化的,传统的静态事故链算法难以满足事故分析的需要。下面给出一种基于随机 Petri网的动态搜索算法,该算法采用方向跟踪技术,快速求导致顶事件发生的事故链  $G_{min}$ 。

快速动态搜索事故链算法流程图如图 3 所示,根据随机 Petri网模型位置状态  $M$  的变化,从顶事件开始依次向下搜索,初始状态为  $M_0$ ,每向下一步  $G_{min}$ 随之改变,根据确定每一位置事件发生的条件,层层向下计算,最后得到导致顶事件发生的事故链  $G_{min}$ 。

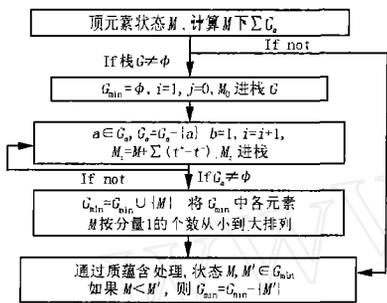


图 3 动态搜索事故链算法

Fig 3 Dynamic searching algorithm of fault chains

在得到系统事故链的基础上,按所含底事件的个数从小到大次序排列,可得到各底事件的结构重要度  $\phi(P_i)$ ,  $i=1, 2, \dots$ 。对各事件进行发生概率分析,可以得到相应的概率重要度。底事件  $P_i$  发生的概率  $i$ , 系统故障概率  $P\{M | \phi(P_i) = 1\}$  是  $G(1, 2, \dots, n)$  的函数,则概率重要度

$$I_i^r = \frac{\partial G(1, 2, \dots, n)}{\partial i} \quad (5)$$

当  $i=0.5$  时,由式 (5) 即求得结构重要度,结合结构重要度和概率重要度,可以定义一个反应事故影响程度的阈值,重点监控  $G(\phi, I) >$  的事件。

## 2 地区电网事故链 SPN 模型的分析控制方法

### 2.1 事故链的 SPN 模型分析方法

本文仅从逻辑层面对涉及地区电网安全的事故链进行分析,暂不考虑稳定问题和电网物理约束,有关稳定问题对事故链分析的影响将另文阐述。对于具体的电力网络,首先以顶事件为线索(例如整个电网崩溃),利用事故反应逻辑条件和相互之间的联系,列出电力系统事故链 SPN 的主模型,底事件为元件层的事件。元件层分别建立相应的 SPN 子模型,子模型涉及元件失效或故障的各个影响因素。通过随机 Petri网的可达标志图和事故链动态搜索算法,求出导致顶事件发生的事故链,并求出结构重

要度和概率重要度,确定阈值,列出需要监控的事故序列。在求取稳定状态概率的基础上,针对随机 Petri网的性能分析,状态空间与马尔可夫链同构,求出相关性能指标。根据系统状态启动安全预警机制,按照危险状态严重程度依次分为蓝色、黄色、橙色、红色四个等级,根据不同等级制定不同的应急响应方案,提请值班人员进入警戒状态。在对小概率事故链的 Petri网模型中的每个系统安全状态变量引入反馈竞争控制变迁  $T$  和可控位置事件  $U$ ,应用于事故情况下实时切断事故链。对于每一事故或失效位置事件,可以通过诸如 NTEMOR 系统准实时代理处理<sup>[13]</sup>,得出专家处理意见,形成反馈控制变迁。

### 2.2 地区电网事故链控制思想

按照事故的多米诺骨牌效应,对事故链进行控制的基本思想是切断事故链的一个或多个环节,而不是控制所有的环节。切断事故链的一个或多个环节的方法是对该环节所涉及事故影响因素进行控制。选择的事故影响因素必须是可控的,最好是实时可控的。对非实时可控的控制环节,通过人机界面提请手动控制执行。对于事故链  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ ,每条事故链有  $m$  个影响因素,对应于元件的 SPN 子模型

$$M_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\} \quad (6)$$

式中:  $p_{ij}$  对应于元件子模型的位置事件。

基于随机 Petri网建立电力系统事故链模型,首先要保证事故链基本事件的实时可观测,只有在可观测的基础上才能实现控制,通过随机 Petri网分析软件与 EMS/DMS/SCADA 系统的连接实现位置状态的实时监测,对于设备元件失效度数据可以利用电力系统可靠性理论确定。采用动态搜索算法得出系统级事故链后,引入一种动态监控的方法实现对事故链的实时监控,利用定量分析的结果,以一组控制规则或优化方法,通过与希望的正常状态相匹配,控制事故链事件的发生。

### 2.3 采用 SPN 模型控制方法的实现

将电力系统事故链监控系统看作粗离散事件系统处理,由于事故链是由一系列的事件序列组成的(有些可控有些不可控),假设底事件可控可观测(或者底事件的影响因素可控),设计一种带控制功能的 SPN 完成事故链的控制。由于导致顶事件发生的底事件影响因素非常多,不可能对每个量都加以考虑,这里利用结构重要度和概率重要度的计算结果,只对  $G(\phi, I) >$  的事故链进行重点监控。通过设计带控制功能的随机 Petri网来完成事故链

的优化控制,算法目的是找出控制集  $U$  实现对事故链的控制<sup>[14,15]</sup>。具体算法如下:

(1) 满足  $P(G_i) >$  的事故链为  $G_1, G_2 \dots G_n$ , 输入当前发生的事件  $P_j$  和当前的状态  $M_0$ ;

(2) 利用 Petri网的可达标志图求出该时刻的并发事件集  $con$ , 定义控制模式  $\Sigma_{con}$  为特定状态下的反馈控制变迁触发集合。

(3) 定义一个状态转移函数  $(\Sigma_{con}, U, M_i)$ , 反馈映射  $:M_i \rightarrow \Sigma_{con}$  它映射  $G$  的状态到某个控制模式  $con(U)$ ;

(4) 利用可控变迁集  $T$  和可控位置事件集  $U$ , 对于任一可控事件  $U_{con} \in U$ , 输出满足即禁止顶事件发生的函数  $u(t, P_j, P_i, con(U_i)) = 0$  的控制集  $U$ , 控制集  $U$  都是针对可观测可控底事件的。

对于复杂的大系统,往往要考虑多重并发事件的组合,而且相关影响条件也是多维的,故求出来的控制集也是多维的。

### 3 实例分析

为了验证上述方法的有效性,以图 4 所示的某地区电网为例进行实例分析。模型仿真软件为 Visual Object Net ++, 它是一个 PC 平台全新的 Petri 网 CAD 工具,支持混合连续和离散事件 Petri 网。通过该软件可以形象化地显示位置中标志的转移过程(即状态转移)。利用概率重要度和结构重要度的计算结果,结合地区电网的事故链 Petri 网模型设计控制功能,为安全预控提供支持,如元件事故启动事故处理系统,系统事故启动紧急控制等。

在目前的认知条件下,经过省调稳定计算,该地区电网不存在稳定问题。一、二类负荷主要集中在

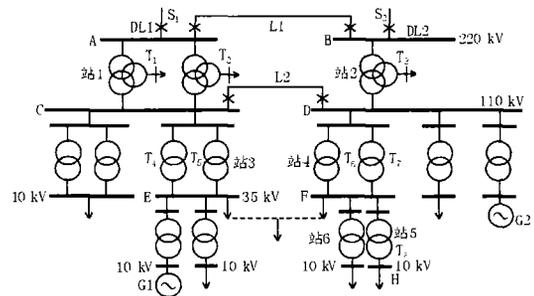


图 4 某地区电网接线简图

Fig 4 Single-line diagram of network system

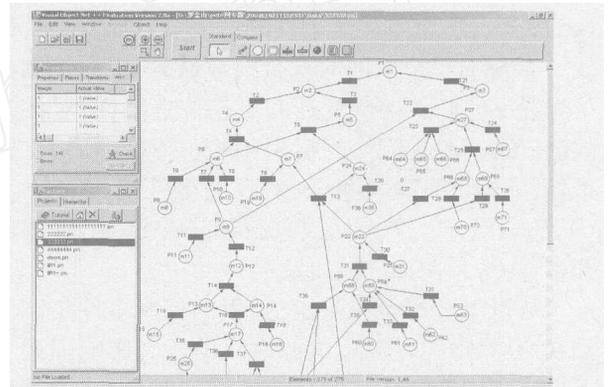


图 5 利用 Visual Object Net ++ 建立的事故链模型

Fig 5 Fault chain model using Visual Object Net ++

变电站 1、3、4、5 中;变电站 1、5 的一、二类负荷由变压器  $T_1$  和  $T_2$  的低压侧 10 kV 母线和母线 H 构成手拉手接线;变电站 3、4 的一、二类负荷由母线 E、F 构成手拉手供电。 $P_1$  为一、二类负荷供电失效,根据电力生产事故调查规程和事故反应逻辑建立以变压器故障、电源故障、母线和线路故障为基本位置事件的随机 Petri 网主模型,各元件分别建立子模型。

表 1 部分算例结果分析

Tab 1 Analysis of partial examples

基本位置事件	含义	$(P_i) / (\%)$	相关事件链 $G_{min}$	控制集 $U$
$P_{18}$	母线 A 故障	0.788 019	$P_{15} P_{18} (P_{22} + P_{42} P_{39} + P_{50} + P_{55} P_{56} + P_{67} + P_{70} P_{71})$	$\{U_{T3}, U_{S2}, U_D, U_B, U_{T8}, U_{L2}, U_H, U_{T6}\}$
$P_{30}$	电源 $S_1$ 故障	0.762 529	$P_{30} P_{34} (P_{22} + P_{42} P_{39} + P_{50} + P_{55} P_{56} + P_{67} + P_{70} P_{71})$	$\{U_{S2}, U_{T3}, U_{T8}, U_C, U_{L2}, U_{T6}, U_{T7}, U_{L1}, U_H\}$
$P_{35}, P_{36}$	变压器 $T_1, T_2$ 故障	0.423 816	$[(P_{41} P_{42} + P_{39} + P_{41} P_{47} + P_{41} P_{48} + P_{43} P_{45}) (P_{50} + P_{55} P_{56} + P_{42} P_{39}) + P_{11} + P_{15} + P_8] [P_{31} P_{35} P_{36} + P_{35} P_{36} (P_{61} + P_{62} + P_{63})]$	$\{U_{T8}, U_F, U_D, U_{G2}, U_{T1}, U_{T4}, U_{T5}, U_E, U_{L1}, U_B, U_H\}$

如图 5 所示为该地区电网的随机 Petri 网事故链模型,位置事件中标识(Token)的转移反应了事故的演变过程。利用单个位置事件的结构重要度来确定需要重点监控的危险事故链。当地区电网的结

构和负荷发生变化后,SPN 模型也将发生变化,则重新进行事故链的动态搜索。

通过计算  $(P_i), \phi(P_{18}) = 0.788 019 > \phi(P_{30}) = 0.762 529 > \phi(P_{35}) = \phi(P_{36}) = 0.423$

$816 > \phi(P_{15}) = 0.379063$ , 结合  $G(\phi, I) > = 0.05$  得到需要重点监控的危险事故链为

$$G_{\min} = [ (P_{41}P_{42} + P_{39} + P_{41}P_{47} + P_{41}P_{48} + P_{43}P_{45}) (P_{50} + P_{55}P_{56} + P_{42}P_{39}) + P_{11} + P_{15} + P_8 ] [ P_{34} (P_{61} + P_{62} + P_{63}) + P_{30}P_{35}P_{36} + P_{35}P_{36} (P_{61} + P_{62} + P_{63}) ] + [ (P_{30}P_{34} + P_{30}P_{62} + P_{34}P_{35}P_{36} + P_{39} + P_{41}P_{47} + P_{41}P_{48} + P_{43}P_{45}) P_{11} + P_{15}P_{18} ] (P_{22} + P_{42}P_{39} + P_{50} + P_{55}P_{56} + P_{67} + P_{70}P_{71})$$

根据所建模型及软件模拟结果,利用事故链求解算法得到如表 1 所示的算例结果(表 1 省略了  $G(\phi, I) < 0.05$  基本位置事件的结果)。结果表明,母线 A 故障对整个电网的安全权数最大,根据控制集  $U$  配置反馈竞争控制变迁和可控位置事件,对该事故链进行实时控制。当标识 Token 转移到  $P_{18}$  位置事件,立即出发变迁集  $T$ ; 对控制事件集  $\{U_{T3}, U_{S2}, U_D, U_B, U_{T8}, U_{L2}, U_H, U_{T6}\}$  进行闭锁控制,则有效避开事件  $P_{18}$  相关事故链的发生。

从以上分析可以看出,这里的控制事件集涉及到变压器、母线、线路、电源事故的所有影响因素和条件。利用控制变迁对事故实施实时监控,同时启动 NTEMOR 实时智能事故监控系统,完成动态监控,确保了一、二类负荷的持续供电。

#### 4 结语

本文结合现代安全科学理论和随机 Petri 网模型方法,以离散化事故发生逻辑的思想,对地区电网事故链进行了建模、分析和控制,设计了实时动态的事故链搜索算法和优化控制算法,为地区电网安全预控提供了一种新的理论方法。该方法克服了可靠性理论对系统实时性把握不足的缺点,跟踪系统状态不断的变化,动态搜索需要重点监控的地区电网事故链,并对危险事件及其影响条件实施控制,可以有效地避免危害系统安全的并发事件的发生。然而,电力系统的事故链模型还须考虑系统运行的稳定性和各种物理约束,以及实时反应设备安全状态的数据来源问题,这些问题将是下一步研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] 韩祯祥,曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6  
HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Power System Security and Its Prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [2] 杨以涵,张东英,马骞,等. 大电网安全防御体系的基础研究[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 23-27.  
YANG Yi-han, ZHANG Dong-ying, MA Qian, et al. Study on the Architecture of Security and Defense System of Large-scale Power Grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 23-27.
- [3] 李生虎,丁明,王敏. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 27-32.  
LI Sheng-hu, DING Ming, WANG Min. Search of Power System Chained Failure Mode Considering Uncertainty[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 27-32.
- [4] Volovoi V, Kavalieratos G, Waters M, et al. Modeling the Reliability of Distribution Systems Using Petri Nets[A]. 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power 2004. 567-572.
- [5] SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua. Fault Diagnosis of Electric Power Systems Based on Fuzzy Petri Nets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 2053-2059.
- [6] 孙静,秦世引,宋永华. 模糊 Petri 网在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 74-79.  
SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua. Fuzzy Petri Nets and Its Application in the Fault Diagnosis of Electric Power Systems[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(9): 74-79.
- [7] 任惠,赵洪山,米增强,等. 基于编码 PETRI 网的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 64-68.  
REN Hui, ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, et al. Power System Fault Diagnosis by Use of Encoded Petri Net Models[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 64-68.
- [8] CHEN Chao-shun, LIN Chia-hung, TSAI Hung-ying. A Rule-based Expert System with Colored Petri Net Models for Distribution System Service Restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1073-1080.
- [9] LU Ning, Chow J H, Desrochers A. A Multi-layer Petri Net Model for Deregulated Electric Power Systems[A]. American Control Conference 2002. 513-518.
- [10] Lordache M V, Antsaklis P J. Synthesis of Supervisors Enforcing General Linear Constraints in Petri Nets[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(11): 2036-2039.
- [11] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
LIN Chuang. Stochastic Petri Net & Performance Evaluation of Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [12] 赵洪山,米增强,牛东晓,等. 利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 20-25.  
ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, NIU Dong-xiao, et al. Power System Modelling Using Hybrid System Theory[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(1): 20-25.
- [13] 饶明. NTEMOR 实时智能监控和事故预报防范系统[Z]. 中国-加拿大智能控制工程联合研究中心, 2003.  
RAO Ming. Intelligent Monitoring on-line Real-time System[Z]. China-Canada United Research Center of Intelligent Control Engineering, 2003.
- [14] XIE Xiao-lan. Fluid-stochastic-event Graphs for Evaluation and Optimization of Discrete-event Systems with Failures[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2002, 18(3): 360-367.
- [15] Jin Y C, Reveliotis S A. A Generalized Stochastic Petri Net Model for Performance Analysis and Control of Capacitated Reentrant

Lines[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2003, 19  
(3): 474-480.

监控、随机 Petri网的研究; E-mail: dayspring\_js@126.com

罗毅 (1966-),男,副教授,主要从事 EMS/DMS、电力系统安全  
监控的研究;

涂光瑜 (1941-),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统运行  
与控制的研究。

收稿日期: 2005-08-25; 修回日期: 2005-10-14

作者简介:

罗金山 (1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统事故

### Study on fault chains monitoring in regional power network by using a stochastic Petri net model

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

(College of Electronic & Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Regional power network faults are generally caused by complicated sequences of concurrent chain events. If the model of fault chain can be built before the fault and the complicated chain events sequence of system faults can be analyzed, it is beneficial to monitor the fault of power system. This paper uses a new method on building chain events model of regional power network based on stochastic Petri nets and designs a rapid dynamic searching algorithm to calculate the chain events of the regional power network based on the change of load and structure. This method uses quantitative analysis to locate the dangerous fault chains which require monitoring specially and designs a control algorithm based on influencing factors of regional power network fault. Finally, a regional power network instance is analyzed, the result proves that this method is valid and correct.

**Key words:** fault chains; stochastic Petri nets; security monitoring; predictive control

(上接第 9 页 continued from page 9)

[8] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护 (第三版) [M]. 北京:中国电力出版社,1994.

HE Jia-li, SONG Cong-ju. The Protective Relaying Elements of Electric Power System, Third Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.

收稿日期: 2005-09-13; 修回日期: 2005-10-31

作者简介:

胡佐 (1980-),男,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护  
研究; E-mail: huzuo8000@yahoo.com.cn

李欣然 (1957-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分  
析与控制,电力系统辨识与建模,配电网故障诊断与状态监测等方  
面的研究工作。

### Analysis of earth fault selection based residual current and current angle integration

HU Zuo, LI Xin-ran, SHI Ji-yin

(Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** This paper analyzes the fault feature of system with neutral ungrounding, a new scheme of line selection about earth fault diagnosis in the networks based on "Residual Current Method" and transient current angle comparison with fuzzy information fusion is proposed. It has simple design and concision subordinate function for integrated line selection. A sample selection platform has been built for testing the method. The operation results show the new method has excellent disturbances-proof ability. It is an ideal method for earth-fault selection.

**Key words:** artificial network; residual current comparison; transient current angle comparison; fuzzy information fusion; integration line selection

(上接第 26 页 continued from page 26)

**Abstract:** In this paper, a variable interval fuzzy control arithmetic with self-adjusting factor is proposed in the whole field, which aims at the control system design of UPFC. This control arithmetic can simultaneously enhance steady precision and dynamic performance, moreover it has optimization characteristic. Simulation result indicates that node voltage and line power flow are effectively controlled and the transient stability of power system is improved in the designed control system with quickly response, high precision accuracy and strong robust.

**Key words:** unified power flow controller; self-adjusting; variable interval; fuzzy control