

# 基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析

杨明玉<sup>1</sup>, 田浩<sup>1</sup>, 姚万业<sup>2</sup>

(1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;  
2. 华北电力大学控制科学与工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 分析了现有的三种继电保护隐性故障模型, 建立了新的线路潮流越限时隐性故障模型。该模型考虑了由保护定值导致的可修复隐性故障、由硬件老化导致的不可修复隐性故障以及由恶劣环境等因素引发的隐性故障。采用直流潮流法对电力系统进行连锁故障风险评估, 找出风险指标大的关键线路, 并据此提出了减小系统连锁故障风险的措施。对 TS-9 节点系统仿真结果表明, 通过提高线路保护装置的可靠性, 改善线路的负载能力都能降低风险值, 减小系统发生停电的概率。

**关键词:** 继电保护; 隐性故障; 连锁故障; 直流潮流法; 风险评估

## Analysis of power system cascading failure based on hidden failures of protective relaying

YANG Ming-yu<sup>1</sup>, TIAN hao<sup>1</sup>, YAO Wan-ye<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, North China Electric Power University, Ministry of Education, Baoding 071003, China; 2. Control Science & Engineering School, North China Electric Power University, Ministry of Education, Baoding 071003, China)

**Abstract:** This paper analyzes three existing hidden failure models, proposes a new hidden failure model considering repairable hidden failure, aging hidden failure and the hidden failure caused by adverse environment. It uses DC power flow algorithm to assess the risk of power system cascading failure, thus to find out the key-lines. On this basis the preventive measures to reduce the risk of power system cascading failure are put forward. The results of applying the proposed method to TS-9 bus test system illustrate improving the reliability of the relay and the line capacity can reduce the risk and the propability of blackout.

**Key words:** relay; hidden failure; cascading failure; DC power flow algorithm; risk assessment

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0001-05

## 0 引言

近年来, 停电事故的后果日益严重, 大型停电事故主要是由连锁故障引起的。如 1996 年 7 月美国西部电网(WSCC)和 1998 年 6 月美国中部大陆电网(MAPP)解列事故, 2003 年 8 月美、加大停电事故、2003 年的英国伦敦大停电等<sup>[1-3]</sup>。而造成这些大规模停电事故的罪魁祸首正是继电保护系统的隐性故障<sup>[4-5]</sup>, 有资料表明世界上大约有 75% 的大停电事故都和保护系统的不正确运作有关, 继电保护的隐性故障已经成为电力灾难性的一种机理。

建立继电保护隐性故障的模型并对其进行深入的分析, 已经成为当今研究的热点, 在文献[6-7]提出了考虑线路距离保护, 过电流保护的隐性故障概率模型。在文献[8-9]国内一些学者通过分析国内外相关资料, 提出线路潮流的大规模转移和保护的不

恰当动作, 是连锁故障发生的重要因素, 并提出了线路潮流越限时保护隐性故障概率模型。

由于线路保护种类比较多, 各种不同电压等级的线路装设的保护也不尽相同, 本文通过分析导致保护发生隐性故障的原因, 提出了影响隐性故障概率的几个方面因素, 并加以量化。应用风险理论, 对系统各条线路发生故障时造成的后果进行分析, 并提出通过提高关键线路负载能力, 降低继电保护装置发生隐性故障的概率的措施, 来降低连锁故障发生概率, 减小发生连锁故障的严重度。

## 1 继电保护隐性故障

继电保护隐性故障是指系统正常运行时对系统没有影响的故障, 而当系统某些部分发生变化时, 这种故障就会被触发, 从而导致大面积故障的发生。隐性故障在系统正常运行时是无法发现的, 但是一

旦有故障发生，继电器正确切除故障后，电力系统潮流重新分配，在这样的运行状态下就可能会使带有隐性故障的保护系统误动作。从而有可能造成连锁故障，扩大事故范围。

根据国内外的调查报告，导致继电保护隐患的原因可以大致分为两类：1) 继电保护定值不合理，包括保护定值整定计算错误和保护定值过时（不适合当前的运行方式）；2) 继电保护系统硬件缺陷，包括通信系统故障、测量元件（CT/PT）故障、保护装置元件老化、接触不良、绝缘不良、接线错误等<sup>[10]</sup>。

## 2 继电保护隐性故障模型

现有的三种继电保护隐性故障模型有，考虑输电线路三段距离保护的隐性故障概率模型，考虑阶段式电流保护的隐性故障概率模型，考虑线路潮流越限的继电保护隐性故障概率模型。本文主要分析并建立第三种潮流越限时继电保护隐性故障概率模型。

### 2.1 输电线路三段距离保护隐性故障概率模型<sup>[6]</sup>

文献[6]中提出了输电线路三段距离保护隐性故障概率模型，如图 1 所示。

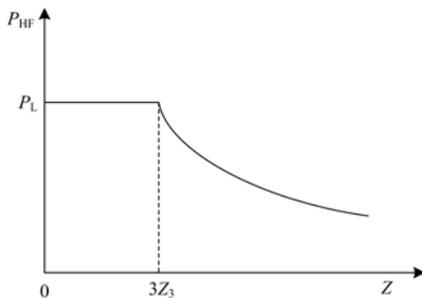


图 1 线路距离保护的隐性故障特性

Fig.1 Hidden failure characteristics of line distance protection

线路距离保护隐性故障概率  $P_{HF}$  与保护装置的测量阻抗  $Z$  有关。当测量阻抗  $Z$  小于 3 倍距离保护第 III 段的整定值  $Z_3$  时，隐性故障概率为常数  $P_L$ ，而测量阻抗  $Z$  大于 3 倍距离保护第 III 段的整定值  $Z_3$  时，隐性故障概率按指数规律迅速减小。隐性故障的概率模型如下：

$$P_{HF} = \begin{cases} P_L & Z < 3Z_3 \\ P_L e^{-\frac{Z}{Z_3}} & Z \geq 3Z_3 \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 阶段式电流保护隐性故障概率模型<sup>[7]</sup>

文献[7]中提出了阶段式电流保护隐性故障概率模型，如图 2 所示。

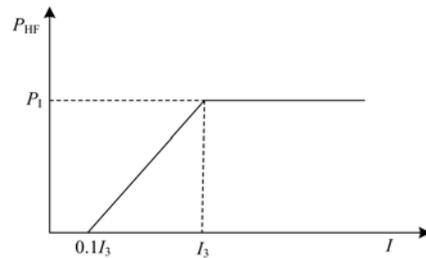


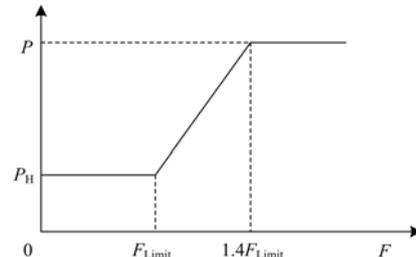
图 2 线路过电流保护的隐性故障特性

Fig.2 Hidden failure characteristics of over-current protection

过电流保护的隐性故障概率  $P_{HF}$  与线路电流的大小有关。线路电流  $I$  大于过电流保护第 III 段的整定值  $I_3$  时隐性故障概率为常数  $P_1$ ，而线路电流  $I$  在  $0.1I_3$  和  $I_3$  范围内时隐性故障概率按直线规律迅速减小至 0，在线路电流  $I$  小于  $0.1I_3$  时隐性故障概率为 0。概率模型如式 (2)：

$$P_{HF} = \begin{cases} P_1 & I > I_3 \\ P_1 \frac{I - 0.1I_3}{0.9I_3} & 0.1I_3 \leq I \leq I_3 \\ 0 & I < 0.1I_3 \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3 考虑线路潮流越限的继电保护隐性故障概率模型 (图 3)



$P_H$ 为隐性故障概率； $P$ 为继电保护动作概率； $F$ 为线路有功潮流

图 3 线路潮流越限时保护的隐性故障特性

Fig.3 Hidden failure characteristics of line protection considered over-flow

当  $F < F_{Limit}$  时，继电保护隐性故障概率  $P_H$  可以分成几个方面来获得，通过分析导致继电保护隐性故障的因素，可以将其分为可修复隐性故障，老化隐性故障以及恶劣气候条件或暴风雨雪灾害造成的隐性故障等。

(1) 可修复隐性故障是指由于继电保护定值不合理等可修复的原因造成的。

$$P_r = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3)$$

式中： $P_r$  为可修复隐性故障率； $\lambda$  为失效率（失效次数/年）； $\mu$  为修复率（修复次数/年）。该数据可以由继电保护厂家获得。

(2) 老化隐性故障，是一种不可修复故障，当

元件进入图4所示的寿命盆谷曲线的耗损期时,可能突然发生老化故障,它是与历史(即元件服役年龄)有关的条件故障事件。

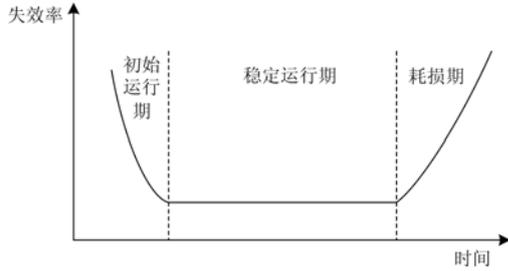


图4 元件寿命盆骨曲线  
Fig.4 Component life curve

按可靠性函数的定义和条件概率的概念,元件已服役 $T$ 年后,在其后续的时间 $t$ 内发生老化故障的概率可计算如式(4):

$$P_t = \frac{\int_T^{T+t} f(t) dt}{\int_T^{\infty} f(t) dt} \quad (4)$$

式中:  $P_t$  为老化隐性故障概率;  $f(t)$  为正态分布或韦布尔分布失效概率密度函数。通过统计正在运行的继电保护装置相关数据,可以计算得到。

(3) 恶劣气候条件或暴风雨雪灾害造成的隐性故障

恶劣环境通常是指刮风、下雨、下雪等不适宜的气候条件,而灾变性环境指诸如暴风雪、龙卷风、火灾、洪水、地震等自然灾害。由于灾变性环境的发生概率及其影响范围仅能粗略估计,因此要对其提出精确的模型是困难的。

该类因素导致的隐性故障主要考虑为导致其它隐性故障发生的概率增大。

(4) 通过分析国家电网公司继电保护装置运行情况,可以看出,在实际的运行中,误碰及运行维护不良也是造成继电保护发生误动作的因素,我们把这类原因造成的误动也归结为继电保护隐性故障。

设保护装置由于该类因素误动的次数为 $q$ , 每条线路保护装置动作的次数为 $n_i$ , 则保护装置隐性故障发生的概率为:

$$P_o = \frac{q}{\sum_{i=1}^M n_i} \quad (5)$$

$P_H$  可以通过上面各种概率来综合得出,当选取好 $P_H$ 后,对于不同负载率的线路可以通过式(6)来得到隐性故障发生概率:

$$P_i = \begin{cases} P_H & F_i < F_{Limit} \\ (F_i - F_{Limit}) \times \frac{P - P_H}{1.4F_{Limit} - F_{Limit}} + P_H & F_{Limit} < F_i < 1.4F_{Limit} \\ P & F_i > 1.4F_{Limit} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $P_i$  为第 $i$ 条线路保护发生隐性故障的概率;  $F_i$  为系统中各条线路的潮流;  $P$  为继电保护正确动作概率。

### 2.4 继电保护隐性故障线路集

由于隐性故障是在系统正常运行时不表现出来,当出现故障或者电力系统处于压力的情况下才发生。继电保护隐性故障线路集,是由当某条线路发生故障后,与之相连在同一母线上的线路和由于通过潮流转移而潮流越限的线路组成。

如图5所示,当线路 $L1$ 的保护装置动作后,可能引发相邻线路 $L2, L3, L4, L5$ 的保护装置发生隐性故障,倘若导致 $L6$ 潮流越限时,我们考虑该线路保护也可能发生隐性故障。线路 $L2, L3, L4, L5, L6$ 形成了相应的隐性故障集。

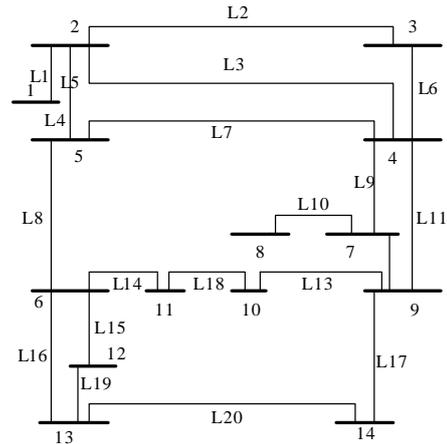


图5 IEEE-14节点模型

Fig.5 IEEE-14 power system model

再当线路 $L5$ 的保护发生隐性故障,则又形成了新的隐性故障集 $L2, L3, L4, L7, L8$ 。隐性故障集可以为分析电力系统连锁故障发生路径提供依据。

## 3 电力系统连锁故障<sup>[11-12]</sup>

### 3.1 连锁故障模型

#### 3.1.1 OPA模型

OPA模型的基础是直流潮流方程,采用标准线性规划方法求解发电机功率调度问题,目标是使价值函数最小化,模型要求系统运行必须满足以下约束条件:在实现功率平衡和负荷节点不注入功率的基

基础上保证发电机输出功率和线路潮流分别小于其极限值。这样，系统为了在解决线性规划问题的同时满足各个约束条件就可能产生连锁过负荷，继而以一定的概率发生连锁故障。

### 3.1.2 CASCADE 模型

CASCADE连锁故障模型的基本思想是：假设有 $n$ 条相同的传输线带有随机初始负荷，初始扰动 $d$ 使得某一个或某些元件发生故障，这些故障元件所带的负荷根据一定的负荷分配原则转移到其它所有未故障元件上，因此形成网络连锁故障。

### 3.1.3 考虑隐性故障的连锁故障模型

该模型采用直流潮流法，同时对以往的隐性故障模型进行改进，并且考虑继电保护装置在初次不受保护之后误动的概率设为零，重合闸不启动，来寻找路径及系统中的薄弱环节。

具体的连锁故障过程仿真由一个随机选择的初始线路跳闸开始，如果连接到该初始线路末端线路潮流超过 $1.4F_{Limit}$ 则出现新的线路跳闸；否则根据隐性故障机理和发生概率来判断线路是否跳闸。每次跳闸后重新计算线路潮流，直至连锁故障停止。

终止约束条件主要考虑以下三条：

- (1) 节点电压是否严重越限；
- (2) 系统发生解列或负荷孤立；
- (3) 发电机跳闸。

## 3.2 连锁故障风险评估指标

电力系统如果发生连锁故障，可能会造成负荷被切除，电源脱离等严重后果，综合这两方面的风险得到连锁故障对电力系统的综合风险值。

$$R_i = P_{event} \times I_{event} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{event} = \prod P_j \\ I_{event} = \frac{\sum S_L}{\sum S} \end{cases}$$

其中： $R_i$ 为连锁故障指标，即第 $i$ 条线路发生隐性故障所导致的连锁故障的严重程度； $P_{event}$ 为由第 $i$ 条线路引发连锁故障的概率； $I_{event}$ 为第 $i$ 条线路引发连锁故障损失电源和负荷功率占总功率的比例； $P_j$ 为发生连锁故障的各条线路跳开的概率。

## 4 仿真分析

### 4.1 模型参数

(1) 仿真电力系统采用TS-9节点模型，线路有功上限都设定为100 MW。不考虑发电机，变压器保护的隐性故障，仅考虑线路保护隐性故障。

(2) 采用线路潮流越限隐性故障概率模型，通过分析文献[13]，取 $P_{H1} = 0.0203$ ；分析文献[14]，取

$P_{H2} = 0.0013$ 。仿真方法采用考虑隐性故障的连锁故障模型，针对9节点系统计算各条线路导致连锁故障时的风险指标。

### 4.2 仿真结果

图6为不同潮流限值的时候各条线路负载率。表1为 $P_{H1} = 0.0203$ ，潮流限值为100 MW是连锁故障风险评估结果。通过改变 $P_{H1}$ 的数值以及潮流限值的大小重新计算风险值，见图7。

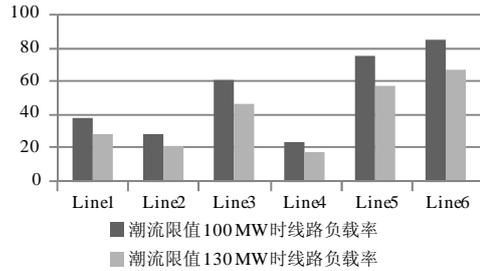


图6 线路潮流负载率

Fig.6 Load rate of the lines

表1  $P_{H1} = 0.0203$ ，潮流限值为100 MW时连锁故障仿真结果

| 初始故障线路 | 连锁故障发生路径             | $R_i$    |
|--------|----------------------|----------|
| Line1  | L1-L6-Load1          | 0.129 66 |
| Line2  | L2-L5-L6-Gen2        | 0.035 54 |
| Line3  | L3-L6-L1-Load1       | 0.127 02 |
| Line4  | L4-L5-Load3          | 0.003 15 |
| Line5  | L5-L6-Gen2           | 0.253 47 |
| Line6  | L6-L5L3L1-Gen2、Load1 | 0.260 16 |

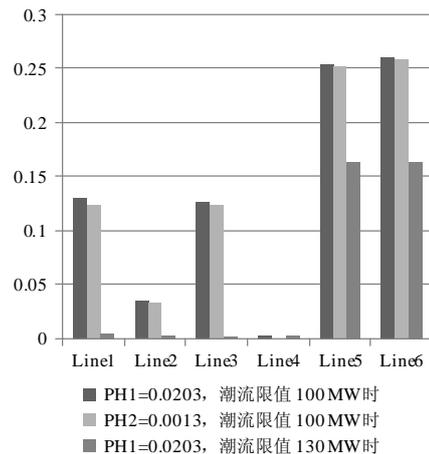


图7 不同条件下线路断开造成的风险值比较

Fig.7 Comparison of line outage risk in different conditions

从仿真结果可以看到，各条线路导致连锁故障的风险值不仅与该线路的负载率有关，而且与该线

路导致连锁故障严重程度有关。在该算例中, 线路5, 6是关键线路, 要重点加强和保护。

通过降低继电保护隐性故障概率, 提高各条线路的潮流限值, 都能降低连锁故障风险指标。

## 5 结论

本文基于继电保护隐性故障模型和电力系统风险理论, 提出了连锁故障产生和评估的方法。基于本文提出的方法, 可以找到 TS-9 节点系统的关键线路, 仿真结果指出降低继电保护隐性故障概率, 提高线路潮流限值都能降低风险值, 降低隐性故障概率从保护原理和硬件制造工艺来加强, 同时也要考虑到恶劣气候对保护装置的影响, 而提高线路潮流限值主要是改造现有的输电线路。本结论对电力系统的安全运行有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5.  
XUE Yu-sheng. The Way from a Simple Contingency to System-wide Disaster——Lessons from the Eastern Interconnection Blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [2] 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 Xue-hao. Rethinking and Enlightenment of Large Scope Blackout in Interconnected North America Power Grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.
- [3] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 1-4.  
LI Zai-hua, BAI Xiao-min, DING Jian, et al. Analysis of the Western Europe Blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 1-4.
- [4] Phadke A G, Thorp J S. Expose Hidden Failures to Prevent Cascading Outages in Power Systems[J]. Computer Applications in Power, IEEE, 1996, 9(3): 20-23.
- [5] Elizondo D C, de La Ree J, Phadke A G, et al. Hidden Failures in Protection Systems and Their Impact on Wide-area Disturbances[A]. in: Power Engineering Society Winter Meeting IEEE[C]. 2001.710-714.
- [6] Bae K, Thorp J S. An Importance Sampling Application: 179 Bus WSCC System under Voltage Based Hidden Failures and Relay Misoperations[A]. in: System Sciences, 1998 Proceedings of the Thirty-First Hawaii International Conference on[C]. 1998. 39-46.
- [7] Yu Xingbin, Singh Chanan. A Practical Approach for Integrated Power System Vulnerability Analysis with Protection Failures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004: 1811-1820.
- [8] 丁理杰, 刘美君, 曹一家, 等. 基于隐性故障模型和风险理论的关键线路辨识[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 1-5, 22.  
DING Li-jie, LIU Mei-jun, CAO Yi-jia, et al. Power System Key-lines Identification Based on Hidden Failure Model and Risk Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 1-5, 22.
- [9] 陈为化, 江全元, 曹一家. 考虑继电保护隐性故障的电力系统连锁故障风险评估[J]. 电网技术, 2007, 30(13): 14-19, 25.  
CHEN Wei-hua, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. Risk Assessment of Power System Cascading Failure Considering Hidden Failures of Protective Relays[J]. Power System Technology, 2007, 30(13): 14-19, 25.
- [10] 施莉, 赵东成, 杨明玉. 关于继电保护系统中隐形故障的探讨[J]. 继电器, 2004, 32(5): 66-69.  
SHI Li, ZHAO Dong-cheng, YANG Ming-yu. Discussion on Hidden Failures in Relay Protection of Power Systems[J]. Relay, 2004, 32(5): 66-69.
- [11] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An Initial Model for Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts[A]. in: Hawaii International Conference on System Science[C]. Hawaii: 2001.
- [12] Carreras B A, Lynch V E, Satchan M L, et al. Modeling Blackout Dynamics in Power Transmission Networks with Simple Structure[A]. in: Hawaii International Conference on System Science[C]. Hawaii: 2001.
- [13] 周玉兰, 许勇, 沈晓凡, 等. 1998年全国电力系统继电保护及安全自动装置运行情况[J]. 电网技术, 1999, 23(11): 62-66, 70.  
ZHOU Yu-lan, XU Yong, SHEN Xiao-fan, et al. Operation of Protective Relays and Automation Devices of Systems in China in 1998[J]. Power System Technology, 1999, 23(11): 62-66, 70.
- [14] 沈晓凡, 舒治淮, 吕鹏飞, 等. 2006年国家电网公司继电保护装置运行情况[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 18-21.  
SHEN Xiao-fan, SHU Zhi-huai, Lü Peng-fei, et al. Operation Situation of Protective Relays of State Grid Corporation of China in 2006[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 18-21.

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-08-21

作者简介:

杨明玉(1965-), 女, 副教授, 主要从事电力系统微机继电保护方面的研究和教学工作;

田浩(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: tim831212@163.com

姚万业(1965-), 男, 副教授, 主要从事控制理论与控制工程的研究。