

考虑隐性故障的继电保护系统可靠性分析及评估

罗泳¹, 李永丽¹, 李仲青², 周泽昕²

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为了更好地评估继电保护系统的可靠性, 搭建了考虑隐性故障和系统运行状态变化时单一保护系统的可靠性模型。而后基于所搭建的可靠性模型, 计算得到了随潮流变化时隐性故障率的变化情况和隐性故障修复率对继电保护系统正常运行的影响, 并给出了基于概率模型的方法对超高压线路继电保护系统的可靠性进行评估。基于概率模型的方法是对马尔可夫状态空间模型方法的一种简化, 适合工程应用, 为完善继电保护系统的可靠性评估提供了可行的数学方法。算例验证了所提方法的正确性。

关键词: 继电保护系统; 隐性故障; 可靠性模型; 隐性故障率; 基于概率模型的方法; 超高压线路继电保护

Assessment of the reliability of protection system considering hidden failure

LUO Yong¹, LI Yong-li¹, LI Zhong-qing², ZHOU Ze-xin²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to better assess the reliability of protection system, this paper builds the Markov model of single protection system considering hidden failure and changes of operating condition. Then based on the model, the changes of hidden failure rate affected by power flow and the effect of hidden failure repair rate on the normal operation of protection devices can be acquired. We also put forward probabilistic model for the reliability assessment of UHV protection system, which is suitable for engineering applications. Probabilistic model is a simplification of Markov state-space model and provides a mathematical way for improving the protection system reliability assessment. The results verify the validity of the algorithm.

This work is supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (No. SGCC-MPLG028-2012).

Key words: relay protection system; hidden failure; reliability model; hidden failure rate; probabilistic model; UHV protection system

中图分类号: TM77, TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0084-06

0 引言

随着电力系统规模的不断扩大, 对电力系统安全和稳定运行的要求也越来越高, 然而继电保护系统的隐性故障已经成为电力灾难发生的一种机理, 对电力系统的安全产生了很大影响^[1], 如 2003 年的美加大停电事故, 2012 年的印度大停电事故等^[2-3]。

继电保护系统的隐性故障是指在电力系统正常运行状态下没有影响, 只是当系统的运行状态发生变化时, 这种故障就会被触发, 从而导致系统故障甚至连锁故障发生的一种故障。根据国内外调查

报告, 导致继电保护隐性故障的原因大致分为两类: 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不能适应系统运行状态变化; 2) 继电保护硬件缺陷, 包括通信系统故障、测量元件故障、保护装置元件老化、接触不良、绝缘不良、接线错误等^[4]。

目前, 继电保护系统的可靠性分析方法主要有马尔可夫模型法, 概率法, 故障树法等^[5], 研究内容主要是围绕保护的可靠性评估指标以及计算模型等方面展开的。文献[6]建立了继电保护系统的状态转移空间, 提出了基于瞬时状态概率的保护系统短期可靠性评估方法。文献[7]基于动态故障树与蒙特卡罗仿真对保护系统的动态可靠性进行评估。文献[8]考虑了不同保护配置方案继电保护系统的可靠

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题 (SGCC-MPLG028-2012)

性。文献[9]给出了保护系统冗余配置时的马尔可夫模型。现有的继电保护可靠性理论研究成果大多数没有涉及隐性故障和系统运行状态变化对继电保护系统可靠性的影响。因此, 如何更为准确地评估保护系统的可靠性, 就成为目前继电保护可靠性研究所面临的重大问题。

本文在考虑隐性故障的情况下搭建了随系统运行状态变化单一保护系统的可靠性模型, 并结合目前超高压线路保护的实际情况给出了基于概率模型进行评估的方法, 最后结合算例对保护系统的可靠性进行了相应的分析及评估。

1 马尔可夫可靠性分析模型

继电保护系统具有马尔可夫过程的性质, 因此本文采用状态空间法综合求解继电保护系统的可靠性指标。在建立保护系统的状态空间图时, 作了如下的假设: (1)可修复的故障在得到修复后即可重新投入使用; (2)评估过程不影响系统的运行。

考虑继电保护系统隐性故障的发生, 我们可以建立单一保护系统的状态空间模型^[10], 如图 1 所示。其中, C 为被保护元件, P 为主保护, UP 表示正常运行状态, DN 表示故障后的停运状态, M 为检修状态, DYM 表示带隐性误动故障隐患的运行状态, DYN 表示带隐性拒动故障隐患的运行状态。 K_M , K_N 分别为系统运行状态变化后, 带隐性误动故障隐患运行的主保护误动风险增益值和带隐性拒动故障隐患运行的主保护拒动风险增益值, 箭头表示计算增益值的方向。假设系统处于正常运行状态时的隐性误动故障率, 隐性拒动故障率分别为 λ_{DYM} 和 λ_{DYN} , 则当系统的运行方式变化后, 可以得到此时的隐性误动故障率为 $\lambda_{DYM}^* = K_M \lambda_{DYM}$, 隐性拒动故障率为 $\lambda_{DYN}^* = K_N \lambda_{DYN}$ 。

下面仅就图 1 中涉及隐性故障部分的状态变化

进行说明。在状态 1, 主保护 P 和被保护元件 C 处于正常运行状态。若主保护 P 出现隐性误动故障, 此时进入状态 5; 若主保护 P 出现隐性拒动故障, 此时进入状态 6。在状态 2, 主保护 P 和被保护元件 C 处于检修状态。若在检修完成后, 由于检修中的人为因素或其他因素引入隐性误动故障, 则此时进入状态 5; 若在检修完成后, 由于检修中的人为因素或其他因素引入隐性拒动故障, 则此时进入状态 6。在状态 5, 若被保护元件 C 发生故障, 主保护 P 就会动作跳闸切除元件 C, 这被视为正确动作, 隐性误动故障不会被发现, 此时进入状态 7; 若在状态 5 时外部系统的状态发生变化触发主保护 P 的隐性误动故障, 主保护 P 就会误动作跳闸切除元件 C, 此时主保护 P 的隐性误动故障被发现, 进入状态 4。在状态 6, 若被保护元件 C 故障, 则主保护 P 的隐性拒动故障就会暴露, 出现拒动, 进入到状态 8。

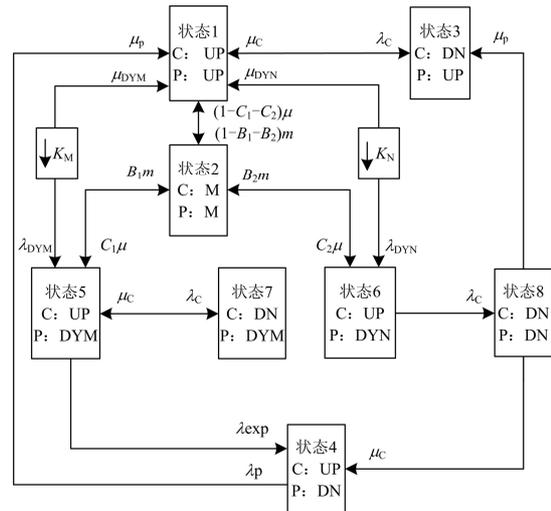


图 1 单一保护系统的状态空间图

Fig. 1 State-space of single protection

由图 1 可得其对应的马尔可夫过渡矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} -S_1 & (1-B_1-B_2)m & \lambda_c & \lambda_B & K_M \lambda_{DYM} & K_N \lambda_{DYN} & 0 & 0 \\ (1-C_1-C_2)\mu & -\mu & 0 & 0 & C_1\mu & C_2\mu & 0 & 0 \\ \mu_c & 0 & -\mu_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_B & 0 & 0 & -\mu_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{DYM} & B_1m & 0 & \lambda_{exp} & -S_5 & 0 & \lambda_c & 0 \\ \mu_{DYN} & B_2m & 0 & 0 & 0 & -S_6 & 0 & \lambda_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_c & 0 & -\mu_c & 0 \\ 0 & 0 & \mu_B & \mu_c & 0 & 0 & 0 & -\mu_B - \mu_c \end{bmatrix}$$

其中: $S_1 = (1 - B_1 - B_2)m + \lambda_c + \lambda_p + K_M \lambda_{DYM} + K_N \lambda_{DYN}$;
 $S_5 = \mu_{DYM} + B_1 m + \lambda_{exp} + \lambda_c$; $S_6 = \mu_{DYN} + B_2 m + \lambda_c$;
 $S_8 = \mu_p + \mu_c$ 。设图 1 中处于状态 1, 状态 2, ..., 状态 8 的概率分别为 $P_1(t), P_2(t), \dots, P_8(t)$, 令 $\mathbf{P}(t) = [P_1(t), P_2(t), \dots, P_8(t)]$, 则通过求解矩阵方程 $\mathbf{P}(t)\mathbf{Q} = 0$ 可得 $P_1(t), P_2(t), \dots, P_8(t)$, 即可知保护处于正常工作状态的概率为 $P_1(t)$, 处于带隐性故障隐患运行状态的概率为 $P_{隐} = P_5(t) + P_6(t)$, 处于故障或停运状态的概率为 $P_{停}(t) = P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_7(t) + P_8(t)$ 。

2 超高压线路继电保护系统可靠性评估方法

目前, 在我国的超高压线路中, 220 kV 及以上电压等级的线路基本上都配置了双套主保护和后备保护。线路的主保护一般采用纵联保护^[11]; 后备保护则多以距离保护、零序保护为主。主保护采用双重化设计^[12], 可以看作是完全独立的; 主保护和后备保护在原理和装置上都是独立的, 动作时限也不同, 这样主保护和后备保护之间可以看作是相互独立的, 因此本文在进行系统可靠性评估时将主保护和后备保护分开考虑。它们之间的关系示意图如图 2 所示。其中, P_1, P_2 分别为第一套、第二套主保护, B 为后备保护, CB 为跳闸线圈。此处用继电器 K1 和 K2 表示主保护和后备保护的動作关系, K1、K2 开关为常闭开关, 只有当第一、二套主保护均处于故障或者检修状态, K1、K2 线圈均不通电时, K1 和 K2 开关才能同时保持闭合。此时在到达后备保护的整定时间后, 由后备保护动作发出跳闸信号并作用于跳闸线圈。

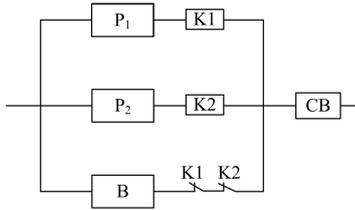


图 2 超高压线路保护系统动作简单图示

Fig. 2 Simple diagram of UHV line protection system

将两套主保护和后备保护分别用单一保护系统的状态空间模型进行评估, 再运用概率的方法将其综合计算, 这就是基于概率模型评估超高压线路继电保护系统可靠性的步骤。当然, 通过搭建超高压线路继电保护系统整体的状态空间模型也可对其可靠性进行评估, 但是此种方法计算模型和计算过程都比较复杂, 而且对于可靠性统计数据的要求较

高, 在现有的条件下, 有些数据无法得到, 因此通过寻找超高压线路继电保护系统主保护与后备保护之间的关系得到了更为简单可行的方法, 大大简化了计算过程。经算例验证, 这两种方法所得结果很相近。

在对超高压线路继电保护系统进行简单可靠性计算前, 我们做如下假设: (1)系统为不可修复系统; (2)评估过程不影响系统的运行。

设第一套主保护装置, 第二套主保护装置和后备保护装置处于正常工作状态, 带隐性故障隐患运行状态, 故障状态的概率分别为 $P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{31}, P_{32}, P_{33}$ 。在这里不计检修状态, 则通过对此保护系统的可靠性逻辑进行分析, 可以得到各状态的概率如表 1 所示。

表 1 保护系统处于各状态的概率

Table 1 The probability of protection system in each state

后备保护 / 主保护	后备保护正常	后备保护带隐性故障隐患运行	后备保护故障
2 套主保护均正常	$P_{11}P_{21}P_{31}$	$P_{11}P_{21}P_{32}$	$P_{11}P_{21}P_{33}$
1 套主保护正常 1 套主保护带隐性故障隐患运行	$(P_{11}P_{22} + P_{12}P_{21})P_{31}$	$(P_{11}P_{22} + P_{12}P_{21})P_{32}$	$(P_{11}P_{22} + P_{12}P_{21})P_{33}$
1 套主保护正常 1 套主保护故障	$(P_{11}P_{23} + P_{13}P_{21})P_{31}$	$(P_{11}P_{23} + P_{13}P_{21})P_{32}$	$(P_{11}P_{23} + P_{13}P_{21})P_{33}$
1 套主保护带隐性故障隐患运行 1 套主保护故障	$(P_{12}P_{23} + P_{13}P_{22})P_{31}$	$(P_{12}P_{23} + P_{13}P_{22})P_{32}$	$(P_{12}P_{23} + P_{13}P_{22})P_{33}$
2 套主保护带隐性故障隐患运行	$P_{12}P_{22}P_{31}$	$P_{12}P_{22}P_{32}$	$P_{12}P_{22}P_{33}$
2 套主保护故障	$P_{13}P_{23}P_{31}$	$P_{13}P_{23}P_{32}$	$P_{13}P_{23}P_{33}$

由表 1 利用相关的数学知识可得超高压线路继电保护系统处于正常运行状态的概率为 $P_1 = P_{11}P_{21}P_{31}$, 处于带隐性故障隐患运行状态的概率为 $P_{隐} = P_{11}P_{21}P_{32} + (P_{11}P_{22} + P_{12}P_{21})P_{31} + P_{12}P_{22}P_{31} + (P_{11}P_{22} + P_{12}P_{21})P_{32} + P_{12}P_{22}P_{32}$, 处于故障状态的概率为 $P_{故} = 1 - P_{隐} - P_1$ 。

3 算例分析

用上述模型进行算例分析^[13-14]。取 $\mu_p = 0.2h^{-1}$, $\mu = 0.35h^{-1}$, $\mu_c = 0.15h^{-1}$, $\lambda_b = 0.03a^{-1}$, $C_1 = C_2 = 0.02$, $B_1 = B_2 = 0.02$, $\lambda_{exp} = 0.01a^{-1}$, $m = 0.00003085h^{-1}$, $\lambda_{p1} = \lambda_{p2} = 0.02a^{-1}$, $K_M = K_N = 1$, $\lambda_c = 0.05a^{-1}$, $\lambda_{DYM} = \lambda_{DYN} = 0.004a^{-1}$, $\mu_{DYM} = \mu_{DYN} = 0.0001h^{-1}$ 。

在上述参数中, K_M 和 K_N 的值会随着系统运行状态的变化而变化, μ_{DYM} 和 μ_{DYN} 取值和继电保护装置的具体情况有关, 所以在 3.1 节中讨论了单一保护系统的 K_M 和 K_N 值随着系统运行状态的变化而变化的情况, 在 3.2 节中讨论了不同继电保护装置隐性故障的自检对单一保护系统正确动作的影响。最后, 在 3.3 节中给出了超高压线路继电保护系统可靠性评估的算例。

3.1 潮流变化对 K_M 、 K_N 的影响分析

国内外的统计资料表明, 当一条线路被切除以后, 与该线路相连的线路或发电机的保护装置误动的概率也会大大增加, 因此在这里对线路潮流越限时隐性故障的概率模型进行讨论。

如图 3 所示, P_H 为系统正常运行状态下带隐性故障隐患运行状态的概率^[15], P 为正确动作概率, F 为线路的有功潮流, F_{Limit} 为线路有功潮流限值。通过图 1 所示的单一保护系统的状态空间模型可以解得处于状态 5 的概率为 0.009 241, 处于状态 6 的概率为 0.008 829, 因此可以求得 $P_H=0.018 07$ 。

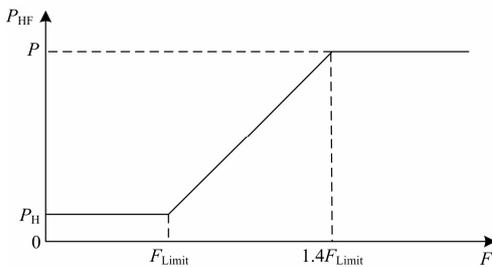


图 3 线路潮流越限时保护的隐性故障特性

Fig. 3 Probability of hidden failure in power flow off-limit

现取 P 为 98.4%, 并取潮流限值 $F_{Limit} = 100$ MW。若知道系统实时的潮流值 F , 则可由图 3 得到对应时刻发生隐性故障的概率值。假设隐性误动故障和隐性拒动故障各占一半, 通过求解矩阵方程 $PQ=0$ 可以得到 K_M 和 K_N 的值。因为 K_M 和 K_N 随有功潮流的变化基本相同, 在这里只画出 K_M 随有功潮流的变化, 如图 4 所示。

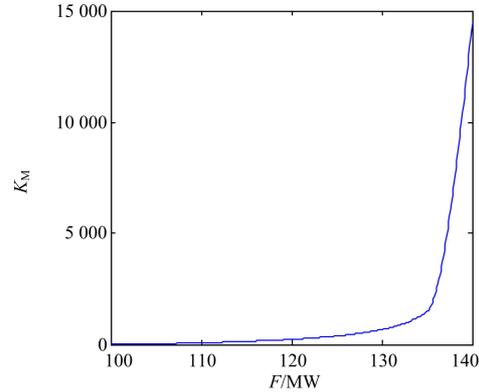


图 4 K_M 随有功潮流 F 变化的图形

Fig. 4 Changes of K_M with the active power F

由图 4 可以看到在有功潮流超越限值后, 随着有功潮流 F 的增大, K_M 和 K_N 先是平稳增大, 在有功潮流值 F 达到 135 MW 后 K_M 和 K_N 开始急剧增大。这说明随着有功潮流超越限值部分的不断增大, 隐性故障率不断增大, 而且增大得越来越快。由图 4 可以查到在系统中有功潮流变化时 K_M 和 K_N 的值, 将所查到的 K_M 和 K_N 的值代入到图 1 的状态空间模型中, 即可对单一保护系统随系统运行状态变化 (线路潮流变化) 的可靠性进行评估。

3.2 隐性故障的自检对继电保护装置正确动作的影响

对于微机继电保护装置来说, 通过自检发现隐性故障并报警, 可以使继电保护装置误动和拒动的可能性大大降低。自检也有着人工检修无法比拟的优点, 例如自检能检查保护装置内人工很难检查到的元件或是存储器的异常^[16]。因此, 分析保护装置的自检对继电保护装置正确动作的影响并据此制定合适的自检方案是十分必要的。

下面就保护装置自检对其自身正确动作的影响进行具体分析。令 $\mu_{DYM} = \mu_{DYN} = \mu_1$, $\lambda_{DYM} = \lambda_{DYN} = 0.002a^{-1}$, 求解矩阵方程 $PQ=0$ 可得保护装置处于正常工作状态的概率 P_1 和隐性故障状态的概率 $P_{隐}$ 。它们之间的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出, 随着隐性故障修复率 μ_1 的不断增大, 继电保护装置处于正常运行状态的概率逐渐增大, 处于带隐性故障隐患运行状态的概率逐渐减小, 这说明增加对隐性故障的自检措施是十分必要的。当 $\mu_1 \in [0, 5 \times 10^{-5}]h^{-1}$ 时, 此时通过增加自检措施, 正常运行状态的概率会很快增大而带隐性故障隐患运行状态的概率会很快减小。但是当 μ_1 大于 $1 \times 10^{-4}h^{-1}$ 时, 再通过增加自检措施来增大正常运行状态的概

率和减小带隐性故障隐患运行状态的概率收效就比较小,而且随着 μ_1 的增大,自检措施的影响会越来越小。

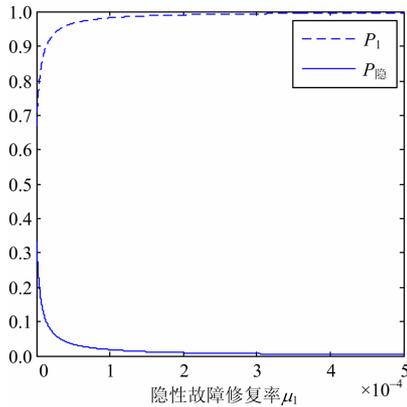


图5 正常状态和隐性故障状态随隐性故障修复率的变化曲线

Fig. 5 Changes of normal state and hidden failure state with the hidden failure repair rate

3.3 基于概率模型可靠性评估法的算例

将两套主保护和后备保护的数据分别代入1.1节所得的过渡矩阵 Q ,通过求解式 $P(t)Q=0$ 可得 $P_{11}=0.991\ 901$, $P_{12}=0.007\ 964$, $P_{13}=0.000\ 049$, $P_{21}=0.991\ 901$, $P_{22}=0.007\ 964$, $P_{23}=0.000\ 049$, $P_{31}=0.991\ 931$, $P_{32}=0.007\ 928$, $P_{33}=0.000\ 055$ 。再将这些所得数据代入第2节所得的公式中,可知超高压继电保护系统处于正常运行状态的概率为 $P_1=0.975\ 929$,处于带隐性故障隐患运行状态的概率为 $P_{\text{隐}}=0.023\ 660$,处于故障状态的概率为 $P_{\text{故}}=0.000\ 242$ 。

4 结论

本文围绕考虑隐性故障情况下继电保护系统的可靠性评估方法进行研究,主要得到了以下四个方面的结果。

1) 搭建了考虑隐性故障和系统运行状态变化时单一保护系统的状态空间模型。

2) 参考线路潮流越限时保护的隐性故障模型得到了有功潮流变化时 K_M 和 K_N 的变化规律,这对于继电保护系统在考虑隐性故障和系统运行状态变化时的可靠性评估具有一定的价值。

3) 对状态空间模型的分析可知完善继电保护装置对隐性故障的自检是十分必要的。

4) 通过对单一保护系统状态空间模型的利用得到了考虑隐性故障情况下对超高压线路继电保护系统进行简单评估的方法。

参考文献

- [1] Anderson P. Power system protection[M]. IEEE Press Power Engineering Series, 1999.
- [2] 戴志辉,王增平. 继电保护可靠性研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 161-167.
DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping. Overview of research on protection reliability[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 161-167.
- [3] 吴宏斌,盛继光. 继电保护设备可靠性评估的数学模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 65-68.
WU Hong-bin, SHENG Ji-guang. Mathematical model and its application of relay protection device reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 65-68.
- [4] 杨明玉,田浩,姚万业. 基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 1-5.
YANG Ming-yu, TIAN Hao, YAO Wan-ye. Analysis of power system cascading failure based on hidden failures of protective relaying[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 1-5.
- [5] Anderson P M. 电力系统保护[M]. 电力系统保护翻译组,译. 北京:中国电力出版社,2008.
Anderson P M. Power system protection[M]. Power System Protection Translation Group, trans. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [6] 李生虎,王京景,刘正楷. 基于瞬时状态概率的保护系统短期可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 50-55.
LI Sheng-hu, WANG Jing-jing, LIU Zheng-kai. Short term reliability evaluation for protection system based on instantaneous state probability[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 50-55.
- [7] 戴志辉,王增平,焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 105-113.
DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping, JIAO Yan-jun. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 105-113.
- [8] 熊小伏,陈飞,周家启,等. 计及不同保护配置方案的继电保护系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 21-24.

- XIONG Xiao-fu, CHEN Fei, ZHOU Jia-qi, et al. Reliability of protection relay systems with different configurations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 21-24.
- [9] 王颖, 王玉东. 超高压线路纵联保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 62-65, 73.
WANG Ying, WANG Yu-dong. Configuration scheme of super-high voltage line pilot protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 62-65, 73.
- [10] 何定金, 贺星棋. 考虑可修多状态的输电线路可靠性评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 11-14, 53.
HE Ding-jin, HE Xing-qi. Evaluation model of reliability for overhead transmission line with considerations of repairable multi-state[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 11-14, 53.
- [11] 宋述勇, 张群英, 阴崇智, 等. 晋东南-荆门特高压线路保护浅析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 24-28.
SONG Shu-yong, ZHANG Qun-ying, YIN Chong-zhi, et al. UHV line protection analysis on Jindongnan- Jingmen[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 24-28.
- [12] 贺家李, 李永丽, 李斌, 等. 特高压输电线继电保护配置方案(二)保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 1-6.
HE Jia-li, LI Yong-li, LI Bin, et al. Relay protection for UHV transmission lines part two disposition of relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 1-6.
- [13] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇, 等. 2009年国家电网公司继电保护装置运行统计与分析[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 189-193.
SHEN Xiao-fan, SHU Zhi-huai, LIU Yu, et al. Operation situation of protective relaying of State Grid Corporation of China in 2009[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 189-193.
- [14] 王睿琛, 薛安成, 毕天姝, 等. 继电保护装置时变失效率估算及其区域性差异分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 11-15, 23.
WANG Rui-chen, XUE An-cheng, BI Tian-shu, et al. Time-varying failure rate estimation of relay protection devices and their regional differences analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 11-15, 23.
- [15] Chen J, Thorp J S, Dobson I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. Electrical Power and Energy System, 2005, 27(4): 318-326.
- [16] 张小鸣, 赵国柱, 王秋阳. 双机继电保护装置可靠性的影响因素[J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2011, 23(2): 50-54.
ZHANG Xiao-ming, ZHAO Guo-zhu, WANG Qiu-yang. Researches on optimum self-test and routine test interval of relay protection equipment[J]. Journal of Changzhou University: Natural Science Edition, 2011, 23(2): 50-54.

收稿日期: 2013-04-23; 修回日期: 2013-05-27

作者简介:

罗泳(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制系统隐性故障辨识与预警技术;
E-mail: luoyong_tju@163.com

李永丽(1963-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统故障与微机保护。