

doi :10.3969/j.issn.1005-3026.2016.08.001

一种改进的电网故障诊断解析模型

王大志¹,江雪晨¹,宁一¹,赵琳琳²

(1. 东北大学 信息科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819 ;2. 辽宁省产品质量监督检验院,辽宁 沈阳 110032)

摘 要: 电网故障过程中保护和断路器动作及告警信息的不确定性,使原有的电网故障诊断完全解析模型存在多解和误诊,因此本文通过解析保护和断路器动作以及告警信息的不确定性,构建一种电网故障诊断的改进解析模型.该模型利用保护和断路器的误动与拒动概率以及告警信息的漏报与误报概率,赋予保护和断路器不同权值,使模型更加合理.此外,通过解析故障过程中保护和断路器的动作状态,降低模型中待求变量的维数.算例仿真结果表明本文方法有效,诊断结果唯一.

关 键 词: 故障诊断;不确定性;解析模型;告警信息;动作状态

中图分类号: TM 711 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)08-1065-05

An Improved Analytical Model for Fault Diagnosis of Power Systems

WANG Da-zhi¹, JIANG Xue-chen¹, NING Yi¹, ZHAO Lin-lin²

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China ;2. Quality Supervision and Inspection Institute of Liaoning Province, Shenyang 110032, China. Corresponding author : JIANG Xue-chen, E-mail : yusao_jiang@163.com)

Abstract : There exists uncertainty about whether protective relays(PRs) and circuit breakers (CBs) operate when a fault occurs , which will result in the wrong solution and multiple solution for fault diagnosis based on the existing complete analytical models of power systems. By analyzing the uncertainty about PRs action , CBs action , and alarm , an improved complete analytical model was proposed. According to the probabilities of uncertain events mentioned above , different weight factors were assigned to various PRs and CBs for making the model more reasonable. At the same time , by analyzing action states of PRs and CBs , the dimensions of variables in this model were reduced. The cases of fault diagnosis verified the validity of the proposed method.

Key words : fault diagnosis ; uncertainty ; analytical model ; alarm data ; action state

电网故障诊断是利用故障发生后所产生的告警信息及时有效地确定故障元件,为调度人员快速辨识和清除故障提供辅助决策,是迅速恢复电网正常运行的前提条件.目前电网故障诊断方法^[1-6]主要有神经网络方法、专家系统方法、解析模型方法,以及基于新原理的方法,如基于贝叶斯网、Petri网.基于新原理的诊断方法目前还处于理论探索阶段,其实际应用诊断效果有待进一步验证.基于神经网络的诊断方法具有良好的自学习和容错能力,诊断速度快,但随着电网规模增大,输入维数急剧增加,致使故障模式组合爆炸.基于专家系统的诊断方法逻辑推理能力强,适合诊断多分支、多规则、多耦合的电网复杂故障,但当故障信息不完整,故障信息有漏报、误报情况时很难得到正确的诊断结论.

基于解析模型的诊断方法是将电网故障诊断描述成使目标函数最小化的0-1整数规划问题,具有严格的数学模型,近年来得到了快速发展.文献[7]将保护、断路器动作的不确定性表示成逻辑变量,建立能够评价保护和断路器拒动和误动

行为的诊断模型,但该模型用实际告警信息替代保护和断路器的理想动作状态,可能导致诊断结果不准确.文献[8]中充分考虑故障元件状态、保护和断路器动作的整体关联性,以及保护和断路器的不确定性,建立了电网故障诊断的完全解析模型,克服了文献[7]中告警信息错误会导致诊断错误的缺点,提高了故障诊断模型的容错性,但没有考虑保护与断路器之间,各类保护之间不确定事件发生概率的差异,致使构造的解析模型在诊断包含多个误动、拒动以及告警信息错误的故障情形时,由于决策故障状态的信息合并相消,面临多解和误诊的可能.

针对现有解析模型存在的不足,本文在文献[8]基础上,提出电网故障诊断的一种改进解析模型.该模型完整保留了保护和断路器间的强耦合性,并利用保护和断路器的误动与拒动概率以及告警信息的漏报与误报概率,赋予保护和断路器不同的权值,有效避免解析模型多解和误判的情况.

1 改进的电网故障诊断解析模型

1.1 保护和断路器的动作状态解析

在下文分析中,符号 \otimes 、 \oplus 、 $-$ 分别表示逻辑运算与、或、非,符号 \otimes 在不影响表达的情况下可省略.

1) 主保护动作期望:若元件 s 发生故障,其主保护 r_i 的动作期望 f_{r_i} 应该有响应.

$$f_{r_i} = s. \tag{1}$$

2) 第 1 后备保护动作期望:如果 s 发生故障,主保护 r_i 拒动,此时第 1 后备保护 r_j 的动作期望 f_{r_j} 应该有响应.

$$f_{r_j} = s\bar{r}_i. \tag{2}$$

3) 第 2 后备保护动作期望:当元件 $s_x \in \mathcal{X}(r_k)$ 故障时($\mathcal{X}(r_k)$ 表示 r_k 保护范围内电网元件的集合),且其主保护 r_i 、第 1 后备保护 r_j 都发生拒动,则 s_x 的第 2 后备保护 r_k 的动作期望 f_{r_k} 应该动作,如果 r_k 到 s_x 关联路径上的所有断路器未跳闸,此时 f_{r_k} 也应该动作.

$$f_{r_k} = \sum_{s_x \in \mathcal{X}(r_k)} (s_x \bar{r}_i \bar{r}_j) \oplus \sum_{s_x \in \mathcal{X}(r_k)} (s_x \prod_{c_l \in \mathcal{P}(r_k, s_x)} \bar{c}_l). \tag{3}$$

式中 $\mathcal{P}(r_k, s_x)$ 是沿供电路径从保护 r_k 处到元件 s_x 处所有断路器的集合.

4) 断路器动作期望:若任一与断路器 c 相关的保护 r_x 动作,则断路器动作期望 f_c 应动作.

$$f_c = \sum_{r_x \in \mathcal{R}(c)} r_x. \tag{4}$$

式中 $\mathcal{R}(c)$ 为所有能驱动断路器 c 跳闸的保护集合.

基于上述对保护和断路器动作期望解析,考虑误动和拒动情况可知,导致任一保护 r 和断路器 c 动作的情况有两种:①动作期望有激励,且未拒动;②发生误动.

综合以上两种情况,保护 r 和断路器 c 的动作状态的解析可表示为

$$\left. \begin{aligned} r &= f_r \bar{d}_r \oplus m_r \\ c &= f_c \bar{d}_c \oplus m_c \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

1.2 原有完全解析模型分析

故障诊断解析模型是将电网元件的状态与保护、断路器动作之间逻辑关系用目标函数表示,是为了把故障诊断表示成求解目标函数最小值问题.文献[7]综合考虑了保护和断路器拒动与误动情况,并对矛盾的逻辑进行约束,提出如下完全解析模型:

$$\begin{aligned} E'(Z') = & \sum_{i=1}^o |r_i - r'_i| + \sum_{i=1}^p |c_i - c'_i| + \\ & \omega'_1 \sum_{i=1}^{o+p} |m_i| + \omega'_2 \sum_{i=1}^{o+p} |d_i| + \omega'_3 \sum_{i=1}^{2o+2p} |F(S, \\ & R, C, M, D)|. \end{aligned} \tag{6}$$

式中 $Z' = \{S, R, C, M, D\}$ 为变量集合, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_z\}$ 表示可疑故障元件的状态集合, z 表示可疑故障元件的数量, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_o\}$, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ 分别表示与 S 相关的保护和断路器理想动作状态, o 为保护的数量, p 为断路器的数量, $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{o+p}\}$ 为保护和断路器的误动集合, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{o+p}\}$ 表示保护和断路器的拒动集合,右侧第 1~2 项分别为保护、断路器的动作状态与告警信息的差异,反映告警信息的误报和漏报情况,例如,保护动作状态 r 与告警信息 r' 对比,若 $r=0, r'=1$,则称告警信息误报,若 $r=1, r'=0$,则称告警信息漏报;第 5 项为模型约束.

理论上,当电网发生故障时,通过求解模型(6)就能得到完备的故障解集,有效提高故障诊断结果的准确性,然而,解析模型(6)在实际应用时存在如下问题:

1) 模型约束是一个高维逻辑方程组,当可疑故障元件较多时,模型(6)中待求变量高达 $z + 3o + 3p$ 个,而高维逻辑方程组的求解非常困难.

2) 解析模型存在多解和误诊情况.以图 1 所示电网的两例故障为例进行说明.

故障 1:母线 A 故障,保护 A_m 动作,断路器 CB_1 和 CB_2 跳开;线路 L_1 故障,保护 L_{1Am} 漏报,

L_{1Bm} 和 L_{1Bp} 拒动,远后备保护 L_{2Ds} 动作,跳开断路器 CB_5 ,收到 A_m 、 L_{2Ds} 、 CB_1 、 CB_2 和 CB_5 动作的告警信息。

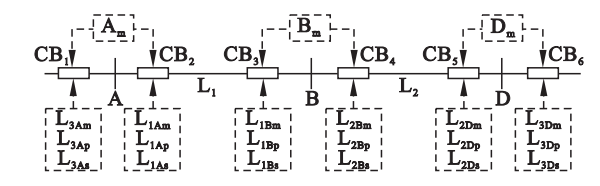


图 1 局部电网示例
Fig. 1 Partial power grid example

由上述告警信息,故障情况可能被错误描述成:母线 A 故障,保护 A_m 动作,断路器 CB_1 和 CB_2 跳开;同时母线 B 故障,保护 B_m 拒动,其远后备保护 L_{2Ds} 动作,跳开断路器 CB_5 。

根据模型(6)构造上述两种故障情况的目标函数为

$$\left. \begin{aligned} \min E(A, L_1) &= 2\omega'_2 + 1 \\ \min E(A, B) &= \omega'_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(7)可知 $\min E(A, B) < \min E(A, L_1)$, 即诊断结果为:母线 A、B 故障。显然,该结论为误判。

故障 2:线路 L_1 、 L_2 故障,保护 L_{1Am} 、 L_{1Bm} 、 L_{2Dm} 动作,保护 L_{2Bm} 漏报,断路器 CB_2 、 CB_3 、 CB_4 和 CB_5 跳开, CB_6 误动。收到 L_{1Am} 、 L_{1Bm} 、 L_{2Dm} 、 CB_2 、 CB_3 、 CB_4 、 CB_5 和 CB_6 动作的告警信息。

根据告警信息,故障情况可能被错误地描述成:线路 L_1 、 L_2 和母线 D 故障,保护 L_{1Am} 、 L_{1Bm} 、 L_{2Dm} 动作,保护 L_{2Bm} 和 D_m 漏报,断路器 CB_2 、 CB_3 、 CB_4 、 CB_5 和 CB_6 跳开。

此时构造的上述两种故障情况目标函数为

$$\left. \begin{aligned} \min E(L_1, L_2) &= 2 \\ \min E(L_1, L_2, D) &= 2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式(8)可知 $\min E(L_1, L_2) = \min E(L_1, L_2, D)$, 得出目标函数有多解:① L_1 、 L_2 故障;② L_1 、 L_2 和母线 D 故障。

1.3 改进的完全解析模型

文献[9]给出保护与断路器之间和各类保护之间不确定事件发生概率。结合上文分析可知,模型(6)中认为各类保护和断路器误动(拒动)概率相同,即对目标函数的贡献度相同,都为 ω'_1 (ω'_2)。不同告警信息漏报、误报概率也相同,贡献度都为 1,而没有考虑保护与断路器之间和各类保护之间不确定事件发生概率的差异,致使在构造目标函数时决策故障状态的信息可能合并相

消,使得模型(6)发生多解和误诊情况。因此,在构建解析模型时,应充分考虑不确定事件概率间的差异。

对任一保护及断路器的状态解析式进行等价变换,得到

$$\left. \begin{aligned} m_r &= \bar{r} \bar{f}_r \\ d_r &= \bar{r} f_r \\ m_c &= \bar{c} \bar{f}_c \\ d_c &= \bar{c} f_c \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

基于上述分析,本文充分考虑了不确定事件概率间的差异,并结合式(9)构建如下解析模型。

$$\begin{aligned} E(Z) &= \sum_{i=1}^o |r_i - r'_i| + \sum_{i=1}^p |c_i - c'_i| + \\ &\omega_{11} \sum_{i=1}^{o_1} |r_i \bar{f}_{r_i}| + \omega_{12} \sum_{i=1}^{o_2} |r_i \bar{f}_{r_i}| + \omega_{13} \sum_{i=1}^{o_3} |r_i \bar{f}_{r_i}| + \\ &\omega_{21} \sum_{i=1}^{o_1} |\bar{r}_i f_{r_i}| + \omega_{22} \sum_{i=1}^{o_2} |\bar{r}_i f_{r_i}| + \omega_{23} \sum_{i=1}^{o_3} |\bar{r}_i f_{r_i}| + \\ &\omega_3 \sum_{i=1}^p (|c_i \bar{f}_{c_i}| + |\bar{c}_i f_{c_i}|). \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $Z = \{S, R, C\}$ 为变量集合; o_1 、 o_2 和 o_3 分别表示线路保护、母线保护和变压器保护的数量,满足 $o_1 + o_2 + o_3 = o$;等式右侧第 1、2 项分别反映保护、断路器告警信息的误报和漏报情况;等式第 3、4、5 项分别为线路、母线和变压器保护误动情况;等式第 6、7、8 项分别表示线路、母线和变压器保护拒动情况;等式第 9 项为断路器误动和拒动情况; ω_{11} 、 ω_{12} 、 ω_{13} 、 ω_{21} 、 ω_{22} 、 ω_{23} 、 ω_3 为各类保护及断路器误动或拒动概率与误报概率之比。

由式(10)可以看出,解析模型中的待求变量由 $z + 3o + 3p$ 个降至 $z + o + p$ 个。

根据文献[9]中统计数据, ω_{11} 、 ω_{12} 、 ω_{13} 分别取 1.16、12.59、5.32; ω_{21} 、 ω_{22} 、 ω_{23} 取 0.09、3.46、0.46; ω_3 取 0.5。

采用改进的模型(10)对上节的两例故障构造目标函数,诊断结果如下。

故障 1:

$$\left. \begin{aligned} \min E(A, L_1) &= 2\omega_{21} + 1 \\ \min E(A, B) &= \omega_{22} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(11)可得 $\min E(A, L_1) < \min E(A, B)$, 即母线 A 和线路 L_1 故障,诊断正确。

故障 2:

$$\left. \begin{aligned} \min E(L_1, L_2) &= 1 + \omega_3 \\ \min E(L_1, L_2, D) &= 2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式(12)可知 $\min E(L_1, L_2) < \min E(L_1, L_2, D)$, 即线路 L_1 、 L_2 故障,诊断正确。

果与算例中的故障情况描述完全相符.

本文对图 2 系统中多起故障案例进行测试 , 并将诊断结果与文献 [7 – 8] 中方法进行比较 , 如表 1 所示 . 由表 1 可知 , 文献 [7 – 8] 的模型存在多解和误诊 , 而本文的改进模型诊断结果唯一 .

表 1 不同解析模型的诊断结果 Table 1 Diagnostic results with different models		
告警信息	文献 [7 – 8]	本文方法
$B_{3m}, L_{(26)-29p}, L_{(29)-26m},$ $CB_{(3)-2}, CB_{(3)-4}, CB_{(26)-29},$ $CB_{(29)-26}$	B_3, L_{26-29}	B_3, L_{26-29}
$L_{(24)-16s}, L_{(21)-16s},$ $CB_{(24)-16}, CB_{(15)-16}, CB_{(21)-16},$ $B_{18m}, CB_{(18)-3}, CB_{(18)-17}$	B_{16}, B_{18}	B_{16}, B_{18}
$L_{(26)-29p}, L_{(29)-26p},$ $CB_{(29)-26}, L_{(4)-3m}, L_{(3)-4m},$ $CB_{(3)-4}, CB_{(4)-3}, L_{(27)-28m},$ $L_{(28)-27m}, L_{(17)-27s}, CB_{(17)-27},$ $CB_{(28)-27}$	$L_{26-29}, L_{4-3},$ L_{27-28}	$L_{26-29},$ $L_{4-3},$ L_{27-28}
$L_{(1)-2m}, L_{(2)-1p}, CB_{(1)-2},$ $CB_{(2)-1}, L_{(19)-1m}, CB_{(1)-19},$ $CB_{(19)-1}, CB_{(19)-9},$ $L_{(16)-19m}, L_{(19)-16p}, CB_{(16)-19},$ $CB_{(19)-16}$	多解： ① $L_{1-2}, L_{1-19}, L_{1-2},$ $L_{16-19}, L_{1-19},$ ② $L_{1-2}, L_{1-19}, L_{16-19},$ L_{16-19}, B_{19}	
$B_{4m}, CB_{(4)-3}, CB_{(4)-5},$ $CB_{(4)-14}, L_{(2)-3s}, L_{(18)-13s},$ $CB_{(2)-3}, CB_{(18)-13}, L_{(25)-26m},$ $L_{(26)-25m}, CB_{(25)-26}, CB_{(26)-25},$ $B_{2m}, CB_{(2)-30}, CB_{(2)-1},$ $CB_{(2)-25}$	误诊： $B_4, B_3,$ B_2, L_{25-26}	$B_4, L_{3-4},$ B_2, L_{25-26}

4 结 语

本文从模型多解和误诊的根源出发 , 赋予保护和断路器不同权值 , 提出一种改进的电网故障诊断解析模型 . 改进的解析模型不仅完整保留了电网元件状态及保护和断路器动作之间的耦合关系 , 而且能有效辨别保护和断路器误动、拒动行为 , 以及消除告警信息漏报、误报对诊断结果的影响 . 然而 , 改进模型中权重的赋值是基于电网运行的经验统计 , 存在一定主观性 , 需要进一步研究如何确定更加合理的权值 .

参考文献：

[1] Xiong G , Shi D , Chen J , et al. Divisional fault diagnosis of large-scale power systems based on radial basis function neural network and fuzzy integra[J]. *Electric Power Systems Research* 2013 , 105 : 9 – 19 .

[2] 刘鑫蕊 , 徐国俊 , 叶金凤 , 等 . 基于多源信息的智能电网动态层次化故障诊断[J]. 东北大学学报(自然科学版) , 2014 , 35(9) : 1221 – 1224 .
(Liu Xin-rui , Xu Guo-jun , Ye Jin-feng , et al. Dynamic hierarchical fault diagnosis of intelligent power network based on the multi-source information[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)* 2014 , 35(9) : 1221 – 1224 .)

[3] Lin X , Ke S , Li Z , et al. A fault diagnosis method of power systems based on improved objective function and genetic algorithm—Tabu search[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2010 , 25(3) : 1268 – 1274 .

[4] Wei L H , Guo W X , Wen F H , et al. Waveform matching approach for fault diagnosis of high voltage transmission lines employing harmony search algorithm[J]. *IET Generation , Transmission and Distribution* 2010 , 4(7) : 801 – 809 .

[5] Sun J , Qin S Y , Song Y H. Fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy Petri nets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems* 2004 , 19(4) : 2053 – 2059 .

[6] Zhu Y L , Huo L M , Lu J L. Bayesian networks-based approach for power systems fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2006 , 21(2) : 634 – 639 .

[7] Guo W X , Wen F H , Ledwich G , et al. An analytic model for fault diagnosis in power system considering malfunctions of protective relays and circuit breakers taken into account[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2010 , 25(3) : 1393 – 1401 .

[8] 刘道兵 , 顾雪平 , 李海鹏 . 电网故障诊断的一种完全解析模型[J]. 中国电机工程学报 , 2011 , 31(34) : 85 – 92 .
(Liu Dao-bing , Gu Xue-ping , Li Hai-peng. A complete analytic model for fault diagnosis of power systems[J]. *Proceedings of the CSEE* 2011 , 31(34) : 85 – 92 .)

[9] 周玉兰 , 王玉玲 , 赵曼勇 . 2004 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J]. 电网技术 , 2005 , 29(16) : 42 – 48 .
(Zhou Yu-lan , Wang Yu-ling , Zhao Man-yong. Statistics of operation situation of protective relay and automation devices of power systems in China in 2004[J]. *Power System Technology* 2005 , 29(16) : 42 – 48 .)

[10] Min S W , Shou J M , Park J K , et al. Adaptive fault section estimation using matrix representation with fuzzy relations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems* , 2004 , 19(2) : 842 – 848 .