

基于电流保护融信因子的站域后备保护

马静¹, 史宇欣², 马伟¹, 邱扬¹, 王增平¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘要: 针对站域保护可方便获取所有就地保护动作信息的特点, 提出了基于电流保护融信因子的站域后备保护方案。首先在线更新站内各元件的自适应电流保护整定值, 并收集保护的動作信息, 再根据保护对各元件的有效保护范围计算保护对元件故障识别的支撑度。然后将其作为保护动作的权重, 构造站域电流保护融信度函数以及融信度期望函数。最后根据二者比值即融信因子识别故障元件。实际变电站数据验证结果表明该方案能正确、快速地识别故障元件, 且无需信息同步, 能够应对信息缺失及错误的情况, 具有良好的适应性以及一定的容错能力。

关键词: 站域保护; 支撑度; 融信度函数; 融信度期望函数; 融信因子

Substation backup protection based on current fusion reliable factor

MA Jing¹, SHI Yuxin², MA Wei¹, QIU Yang¹, WANG Zengping¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute, Shanxi Electric Power Corporation, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Station backup protection based on the current fusion reliable factor is proposed for easy access to all the information of local protection action. First, this paper updates setting values based on the principle of adaptive current protection, collects the action information of current protection and calculates support degree that protection against each component based on effective protection range. Then, it regards the support degree as the right of protection and builds fusion reliable function and fusion reliable expected function of station protection. Finally, faulty component is identified according to their specific value, i.e. fusion reliable factor. The results show that the faulty component can be identified correctly and quickly, and information missing and error situation can be coped with. This scheme of substation protection has good adaptability and fault tolerance.

This work is supported by National Program on Key Basic Research project (973 Program) (No. 2012CB215200), National Natural Science Foundation of China (No. 51277193), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014ZZD02), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of State Education Ministry ([2011] No. 1139), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2012502034), Beijing Metropolis Beijing Nova Program (No. Z141101001814012), the Excellent Talents in Beijing City (No. 2013B009005000001), and the Fund of Fok Ying Tung Education Foundation (No. 141057).

Key words: substation protection; support degree; fusion reliable function; fusion reliable expected function; fusion reliable factor

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0001-09

0 引言

变电站传统保护仅能获取本地单间隔或局部信

息, 这种先天性的不足导致保护已无法同时兼顾选择性、快速性和灵敏性, 且愈加不能满足复杂电网对保护提出的更高要求。同时, 随着以太网逐渐延伸至变电站过程层, 数据以统一格式在公共网络上进行传输, 获取成本大大降低, 传输速度和可共享程度显著提高, 基于全站信息实现站域保护已成为可能^[1-4]。

目前, 利用多信息构成的站域保护算法主要有以下三种: 1) 基于差动原理的站域保护算法^[5-6], 这类算法主要是利用站域范围内电气量信息构成面向

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2012CB215200); 国家自然科学基金项目(51277193); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014ZZD02); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2011]1139号); 河北自然科学基金项目(E2012502034); 北京市科技新星支持计划(Z141101001814012); 北京市优秀人才支持计划(2013B009005000001); 霍英东教育基金(141057)

变电站的电流差动保护；2) 基于方向比较原理的站域保护算法^[7-8]，这类算法利用站内各元件方向信息构造站域方向信息矩阵，按照设定的逻辑关系，判断故障位置；3) 基于多Agent的站域保护算法^[9]，这类算法将多Agent技术应用于站域保护，能够为变电站提供快速、可靠的后备保护和断路器失灵保护。

随着测量系统的完善及数据传输技术的发展^[10-12]，站域保护获取数据的可靠性在一定程度上得到了保证，但数据失真问题依然存在，仍有可能出现信息缺失或错误的情况^[13]。另一方面，现有的站域保护原理在信息正确或单一信息缺失情况下可以准确快速定位故障，但对信息的容错性能有限^[14]，因此，迫切需要研究具有一定容错能力的站域保护。基于此，本文提出一种基于电流保护融信因子的站域后备保护方案。首先在线更新站内各元件自适应电流保护的整定值，并根据保护对元件的有效保护范围推导保护对元件故障识别的支撑度，然后将其作为保护动作的权重，构建站域电流保护融信度函数及融信度期望函数，最后利用二者比值即融信因子的最大值识别故障元件。实际变电站验证结果表明，该算法不受系统运行方式的影响，且无需模拟量信息的交互，在信息非同步情况下能够快速、准确识别故障元件，即使在信息缺失及错误的情况下仍有良好的适应性及容错能力。

1 自适应电流保护整定

站域等值结构图以及各保护元件名称如图1所示，其中： T_g 、 T_z 、 T_d 分别为变压器高、中、低压侧保护， g_m 、 z_m 、 d_m ($m=2a$, $a=1, 2, 3, \dots$)分别为本站高、中、低压出线侧保护， g_n 、 z_n 、 d_n ($n=2a-1$, $a=1, 2, 3, \dots$)分别为该站高、中、低压出线对侧保护。所有保护名称的集合为 $bh=\{T_g, T_z, T_d, g_m, z_m, d_m, g_n, z_n, d_n\}$ ，元件名称的集合为 $yh=\{T, L_{g1}, L_{z1}, L_{d1}, L_{g2}, L_{z2}, L_{d2}, \dots, L_{gn}, L_{zn}, L_{dn}\}$ 。

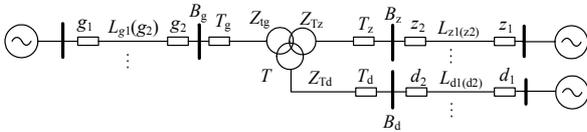


图1 站域结构图

Fig. 1 Framework of substation-area power network

自适应保护能根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时改变保护性能、特性或定值，可有效改善继电保护的性能，有助于系统安全稳定运行。因此，开展自适应保护的研究有着重要的理论和现实意义^[15-16]。本文以自适应电流保护原理^[17]为基础，计算各元件保护的整定值，并定义 $Z_{s,bh}$ 为当前

系统运行方式下保护背侧的系统阻抗。

1.1 变压器整定方法

(1) 变压器 I 段整定

变压器 I 段动作表示故障仅可能发生在变压器元件，应躲过变压器短路情况时流过保护元件的短路电流，其整定值 i_{set,T_i}^I 为

$$i_{set,T_i}^I = K_{rel} \max \left\{ \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_j-T_i} (Z_{m,T_j} + Z_{T_j})}, \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_k-T_i} (Z_{m,T_k} + Z_{T_k})} \right\} \quad (1)$$

式中： K_{rel} 为可靠系数； K_f 为故障类型系数； \dot{E} ($\dot{E} = \dot{U}_m + \dot{I}_m Z_s$)为系统的等效相电势；编号 i 、 j 、 k 三者对应关系如表1所示， Z_{T_i} 、 Z_{T_j} 、 Z_{T_k} 分别为变压器相应侧的阻抗； Z_{m,T_j} 为 i 和 k 侧系统对 Z_{T_j} 的等值阻抗，等效于 $Z_{S,T_i} + Z_{T_i}$ 与 $Z_{S,T_k} + Z_{T_k}$ 并联； Z_{m,T_k} 为 i 和 j 侧系统对 Z_{T_k} 的等值阻抗，等效于 $Z_{S,T_i} + Z_{T_i}$ 与 $Z_{S,T_j} + Z_{T_j}$ 并联； $K_{bT_j-T_i}$ 、 $K_{bT_k-T_i}$ 为分支系数。

表1 编号 i 、 j 、 k 对应关系

Table 1 Corresponding relationship of number i, j, k			
编号	i	j	k
取值情况 1	g	z	d
取值情况 2	z	d	g
取值情况 3	d	g	z

(2) 变压器 II 段整定

变压器 II 段应能保证在变压器发生故障时可靠动作，其整定值 i_{set,T_i}^{II} 为

$$i_{set,T_i}^{II} = \frac{\min \left\{ \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_j-T_i} (Z_{m,T_j} + Z_{T_j})}, \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_k-T_i} (Z_{m,T_k} + Z_{T_k})} \right\}}{K_{sen}} \quad (2)$$

式中： $i=g, z, d$ ； K_{sen} 为灵敏度。

(3) 变压器 III 段整定

变压器 III 段反应变压器和下级线路的故障，需按下级出线末端故障时流过保护元件的电流来整定，其整定值 i_{set,T_i}^{III} 为

$$i_{set,T_i}^{III} = \frac{\min \left\{ \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_j-T_i} (Z_{S,j_m} + Z_{L,j_m})}, \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_k-T_i} (Z_{S,k_m} + Z_{L,k_m})} \right\}}{K_{sen}} \quad (3)$$

式中： Z_{L,i_m} 、 Z_{L,j_m} 、 Z_{L,k_m} 分别为保护 i_m 、 j_m 、 k_m 所在线路的阻抗； Z_{S,j_m} 、 Z_{S,k_m} 分别为当前系统运行方式下保护 j_m 、 k_m 背侧的系统阻抗； $K_{bT_j-T_i}$ 、 $K_{bT_k-T_i}$ 为分支

系数; 保护 j_m 、 k_m 为保护 T_i 正方向的下级保护元件。

1.2 线路整定方法

(1) 线路 I 段整定

线路保护 I 段按躲过本线路末端短路时流过保护元件的电流来整定, 其整定值 $\dot{I}_{\text{set},i_n}^I$ 为

$$\dot{I}_{\text{set},i_n}^I = \frac{K_{\text{rel}} K_f \dot{E}}{Z_{S,i_n} + Z_{L,i_n}} \quad (4)$$

式中: $i=g, z, d$; Z_{S,i_n} 为当前系统运行方式下保护 i_n 背侧的系统阻抗; Z_{L,i_n} 为保护 i_n 所在线路的阻抗; 保护 i_m 的 I 段整定同保护 i_n 。

(2) 线路 II 段整定

线路保护 II 段按保证本线路末端短路时有足够灵敏度整定, 其整定值 $\dot{I}_{\text{set},i_n}^{II}$ 为

$$\dot{I}_{\text{set},i_n}^{II} = \frac{K_f \dot{E}}{K_{\text{sen}} (Z_{S,i_n} + Z_{L,i_n})} \quad (5)$$

(3) 线路 III 段整定

线路保护 III 段按保证下级元件故障时有足够灵敏度整定, 其整定值 $\dot{I}_{\text{set},i_n}^{III}$ 为

$$\dot{I}_{\text{set},i_n}^{III} = \frac{\min \left\{ \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_j-T_i} (Z_{m,T_j} + Z_{T_j})}, \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_k-T_i} (Z_{m,T_k} + Z_{T_k})} \right\}}{K_{\text{sen}} K_{bT_i-i_n}} \quad (6)$$

式中: 保护 T_i 为保护 i_n 正方向的下级保护元件; $K_{bT_i-i_n}$ 、 $K_{bT_k-T_i}$ 为分支系数。

按上述原则整定的自适应电流保护可以反应保护动作与其正方向上发生故障的位置之间的关系。若 I 段动作, 则故障仅可能发生在保护所在本元件; 若 II 段动作, 则故障仅可能发生在本元件及下级元件的一部分; 若 III 段动作, 则故障可能发生在本元件、下级元件及二级元件的一部分。

2 支撑度计算方法

为反应保护动作对识别元件故障的支撑程度, 定义电流保护支撑度 $C_{\text{bh-yj}}$ 为保护 bh 动作时, 故障发生在元件 yj 上的概率。保护范围边界处故障时流过保护的电流与保护整定值 $I_{\text{set,bh}}$ 相等, 即

$$I_{\text{set,bh}} = \frac{K_f E}{K_b (Z_{S,yj} + Z_{\text{abh-yj}})} \quad (7)$$

式中: $Z_{\text{abh-yj}}$ 为保护 bh 对元件 yj 的有效保护范围; K_b 是分支系数。因此, 根据保护整定值可量化保护对元件的有效保护范围 $Z_{\text{abh-yj}}$:

$$Z_{\text{abh-yj}} = \frac{K_f E}{K_b I_{\text{set,bh}}} - Z_{S,yj} \quad (8)$$

以式(8)为基础, 可以计算保护各段对元件的有效保护范围, 求出保护各段对元件的支撑度。

2.1 变压器保护支撑度计算

(1) 变压器保护 I 段支撑度

当 $\dot{I}_{\text{set},T_i}^I > \frac{K_f \dot{E}}{Z_{S,T_i} + Z_{T_i}}$ 时, 变压器保护 T_i 的 I 段在变压器 T 上的有效保护范围为 Z_{T_i} 的一部分 $Z_{\alpha T_i-T}^I(i)$:

$$Z_{\alpha T_i-T}^I(i) = \frac{K_f \dot{E}}{\dot{I}_{\text{set},T_i}^I} - Z_{S,T_i} \quad (9)$$

当 $\dot{I}_{\text{set},T_i}^I < \frac{K_f \dot{E}}{Z_{S,T_i} + Z_{T_i}}$ 时, 变压器保护 T_i 的 I 段在变压器 T 上的有效保护范围为 Z_{T_i} 以及 Z_{T_j} 、 Z_{T_k} 的一部分 $Z_{\alpha T_i-T}^I(i)$ 、 $Z_{\alpha T_i-T}^I(j)$ 、 $Z_{\alpha T_i-T}^I(k)$:

$$\begin{cases} Z_{\alpha T_i-T}^I(i) = Z_{T_i} \\ Z_{\alpha T_i-T}^I(j) = \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_j-T_i} \dot{I}_{\text{set},T_i}^I} - Z_{m,T_j} \\ Z_{\alpha T_i-T}^I(k) = \frac{K_f \dot{E}}{K_{bT_k-T_i} \dot{I}_{\text{set},T_i}^I} - Z_{m,T_k} \end{cases} \quad (10)$$

保护对变压器的有效保护范围 $Z_{\text{abh-T}}$ 为对三侧等效阻抗有效保护范围之和:

$$Z_{\text{abh-T}} = \sum_{i=g,z,d} Z_{\text{abh-T}}(i) \quad (11)$$

由上式可求出变压器保护 T_i 对变压器 T 的有效保护范围, 变压器 I 段仅对变压器元件有保护范围, 因此变压器保护 T_i 的 I 段动作仅对识别变压器故障有支撑度, 对识别其他元件故障没有支撑度, 因此保护 T_i 的 I 段对元件支撑度 $C_{T_i-yj}^I$ 为

$$C_{T_i-yj}^I = \begin{cases} 1 & \text{yj为T} \\ 0 & \text{yj为除T外其他元件} \end{cases} \quad (12)$$

(2) 变压器保护 II 段支撑度

变压器保护 T_i 的 II 段在变压器 T 上的有效保护范围覆盖 T 全部, 即有效保护范围 $Z_{\alpha T_i-T}^{II}(i)$ 、 $Z_{\alpha T_i-T}^{II}(j)$ 、 $Z_{\alpha T_i-T}^{II}(k)$ 为

$$\begin{cases} Z_{\alpha T_i-T}^{II}(i) = Z_{T_i} \\ Z_{\alpha T_i-T}^{II}(j) = Z_{T_j} \\ Z_{\alpha T_i-T}^{II}(k) = Z_{T_k} \end{cases} \quad (13)$$

变压器保护 T_i 的 II 段对下级线路元件 L_{jm} 、 L_{km} 的有效保护范围 $Z_{\alpha T_i-L_{jm}}^{\text{II}}$ 、 $Z_{\alpha T_i-L_{km}}^{\text{II}}$ 为

$$\begin{cases} Z_{\alpha T_i-L_{jm}}^{\text{II}} = \frac{K_f \dot{E}}{K_{b_{jm-T_i}} \dot{I}_{\text{set}, T_i}^{\text{II}}} - Z_{S, L_{jm}} \\ Z_{\alpha T_i-L_{km}}^{\text{II}} = \frac{K_f \dot{E}}{K_{b_{km-T_i}} \dot{I}_{\text{set}, T_i}^{\text{II}}} - Z_{S, L_{km}} \end{cases} \quad (14)$$

变压器保护 T_i 的 II 段对元件的支撑度: 当元件 yj 在 T_i 的 II 段保护范围内时, 支撑度为保护 T_i 的 II 段对该元件 yj 的有效保护范围与对 II 段保护范围内所有元件有效保护范围之和的比值; 当 yj 不在 T_i 的 II 段保护范围时, II 段对 yj 的支撑度为 0, 因此保护 T_i 的 II 段对元件支撑度 $C_{T_i-yj}^{\text{II}}$ 为

$$C_{T_i-yj}^{\text{II}} = \begin{cases} \frac{Z_{\alpha T_i-yj}^{\text{II}}}{\sum Z_{\alpha T_i}^{\text{II}}} & yj \text{ 属于 } T_i \text{ 的 II 段保护范围内} \\ 0 & yj \text{ 不属于 } T_i \text{ 的 II 段保护范围内} \end{cases} \quad (15)$$

(3) 变压器保护 III 段支撑度

变压器保护 T_i 的 III 段在变压器 T 上的有效保护范围覆盖 T 全部, 即有效保护范围 $Z_{\alpha T_i-T}^{\text{III}}(i)$ 、 $Z_{\alpha T_i-T}^{\text{III}}(j)$ 、 $Z_{\alpha T_i-T}^{\text{III}}(k)$ 为

$$\begin{cases} Z_{\alpha T_i-T}^{\text{III}}(i) = Z_{T_i} \\ Z_{\alpha T_i-T}^{\text{III}}(j) = Z_{T_j} \\ Z_{\alpha T_i-T}^{\text{III}}(k) = Z_{T_k} \end{cases} \quad (16)$$

变压器保护 T_i 的 III 段在下级线路元件 L_{jm} 、 L_{km} 上的有效保护范围覆盖该元件全部, 即有效保护范围 $Z_{\alpha T_i-L_{jm}}^{\text{III}}$ 、 $Z_{\alpha T_i-L_{km}}^{\text{III}}$ 为

$$\begin{cases} Z_{\alpha T_i-L_{jm}}^{\text{III}} = Z_{L_{jm}} \\ Z_{\alpha T_i-L_{km}}^{\text{III}} = Z_{L_{km}} \end{cases} \quad (17)$$

变压器保护 T_i 的 III 段对元件的支撑度: 当元件 yj 在 T_i 的 III 段保护范围内时, 支撑度为 III 段对该元件的有效保护范围与 III 段对所有元件有效保护范围之和的比值; 当元件 yj 不在 T_i 的 III 段保护范围内时, III 段对 yj 的支撑度为 0, 因此保护 T_i 的 II 段对元件支撑度 $C_{T_i-yj}^{\text{II}}$ 为

$$C_{T_i-yj}^{\text{III}} = \begin{cases} \frac{Z_{\alpha T_i-yj}^{\text{III}}}{\sum Z_{\alpha T_i}^{\text{III}}} & yj \text{ 属于 } T_i \text{ 的 III 段保护范围内} \\ 0 & yj \text{ 不属于 } T_i \text{ 的 III 段保护范围内} \end{cases} \quad (18)$$

2.2 线路保护支撑度计算

(1) 线路保护 I 段支撑度

以线路保护 i_n 为例, 其 I 段在线路 L_{in} 上的有效保护范围 $Z_{\alpha i_n-L_{in}}^{\text{I}}$ 为保护正方向的一部分:

$$Z_{\alpha i_n-L_{in}}^{\text{I}} = \frac{K_f \dot{E}}{\dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{I}}} - Z_{S, i_n} \quad (19)$$

线路 I 段对元件 yj 故障识别的支撑度 $C_{i_n-yj}^{\text{I}}$ 为

$$C_{i_n-yj}^{\text{I}} = \begin{cases} 1 & yj \text{ 为 } L_{in} \\ 0 & yj \text{ 为除 } L_{in} \text{ 外其他元件} \end{cases} \quad (20)$$

(2) 线路保护 II 段支撑度

线路保护 i_n 的 II 段在本线路 L_{in} 上的有效保护范围覆盖 L_{in} 全部, 即有效保护范围 $Z_{\alpha i_n-L_{in}}^{\text{II}}$ 为

$$Z_{\alpha i_n-L_{in}}^{\text{II}} = Z_{L_{in}} \quad (21)$$

线路保护 i_n 在下级变压器元件上的有效保护范围 $Z_{\alpha i_n-T}^{\text{II}}(i)$ 、 $Z_{\alpha i_n-T}^{\text{II}}(j)$ 、 $Z_{\alpha i_n-T}^{\text{II}}(k)$ 计算如下:

$$\text{当 } \dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{II}} > \frac{K_f \dot{E}}{K_{b_{T_i-i_n}} (Z_{S, T_i} + Z_{T_i})}, \text{ 保护 } i_n \text{ 的 II 段在}$$

下级变压器 T 上的有效保护范围为 Z_{T_i} 的一部分:

$$Z_{\alpha i_n-T}^{\text{II}}(i) = \frac{K_f \dot{E}}{K_{b_{T_i-i_n}} \dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{II}}} - Z_{S, T_i} \quad (22)$$

$$\text{当 } \dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{II}} < \frac{K_f \dot{E}}{K_{b_{T_i-i_n}} (Z_{S, T_i} + Z_{T_i})}, \text{ 保护 } i_n \text{ 的 II 段在}$$

下级变压器上的有效保护范围为 Z_{T_i} 以及 Z_{T_j} 、 Z_{T_k} 的一部分:

$$\begin{cases} Z_{\alpha i_n-T}^{\text{II}}(i) = Z_{T_i} \\ Z_{\alpha i_n-T}^{\text{II}}(j) = \frac{K_f \dot{E}}{K_{b_{T_j-T_i}} K_{b_{T_i-i_n}} \dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{II}}} - Z_{m, T_j} \\ Z_{\alpha i_n-T}^{\text{II}}(k) = \frac{K_f \dot{E}}{K_{b_{T_k-T_i}} K_{b_{T_i-i_n}} \dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{II}}} - Z_{m, T_k} \end{cases} \quad (23)$$

线路保护 i_n 的 II 段对下级线路元件 L_{im} 的有效保护范围 $Z_{\alpha i_n-L_{im}}^{\text{II}}(i)$ 为

$$Z_{\alpha i_n-L_{im}}^{\text{II}}(i) = \frac{K_f \dot{E}}{K_{b_{i_n-i_n}} \dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{II}}} - Z_{S, i_m} \quad (24)$$

类似变压器保护 II 段对元件支撑度的计算, 线路保护 i_n 的 II 段对元件 yj 的支撑度 $C_{i_n-yj}^{\text{II}}$ 为

$$C_{i_n-yj}^{\text{II}} = \begin{cases} \frac{Z_{\alpha i_n-yj}^{\text{II}}}{\sum Z_{\alpha i_n}^{\text{II}}} & yj \text{ 属于 } i_n \text{ 的 II 段保护范围内} \\ 0 & yj \text{ 不属于 } i_n \text{ 的 II 段保护范围内} \end{cases} \quad (25)$$

(3) 线路保护 III 段支撑度

线路保护 i_n 的 III 段在本线路 L_{in} 以及下级元件

变压器 T 上的有效保护范围 $Z_{ai_n-L_{in}}^{\text{III}}$ 、 $Z_{ai_n-T}^{\text{III}}(i)$ 、 $Z_{ai_n-T}^{\text{III}}(j)$ 、 $Z_{ai_n-T}^{\text{III}}(k)$ 覆盖 L_{in} 及 T 全部, 即

$$\begin{cases} Z_{ai_n-L_{in}}^{\text{III}} = Z_{L_{in}} \\ Z_{ai_n-T}^{\text{III}}(i) = Z_{T_i} \\ Z_{ai_n-T}^{\text{III}}(j) = Z_{T_j} \\ Z_{ai_n-T}^{\text{III}}(k) = Z_{T_k} \end{cases} \quad (26)$$

线路保护 i_n 的 III 段在线路 L_{jm} 、 L_{km} 上的有效保护范围 $Z_{ai_n-L_{jm}}^{\text{III}}$ 、 $Z_{ai_n-L_{km}}^{\text{III}}$ 为

$$\begin{cases} Z_{ai_n-L_{jm}}^{\text{III}} = \frac{K_f \dot{E}}{K_{bj_m-i_n} \dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{III}}} - Z_{S_{j_m}} \\ Z_{ai_n-L_{km}}^{\text{III}} = \frac{K_f \dot{E}}{K_{bj_m-i_n} \dot{I}_{\text{set}, i_n}^{\text{III}}} - Z_{S_{k_m}} \end{cases} \quad (27)$$

线路保护 i_n 的 III 段对元件 y_j 的支撑度 $C_{i_n-y_j}^{\text{III}}$ 为

$$C_{i_n-y_j}^{\text{III}} = \begin{cases} \frac{Z_{ai_n-y_j}^{\text{III}}}{\sum Z_{ai_n}^{\text{III}}} & y_j \text{ 属于 } i_n \text{ 的 III 段保护范围内} \\ 0 & y_j \text{ 不属于 } i_n \text{ 的 III 段保护范围内} \end{cases} \quad (28)$$

3 站域电流保护算法

3.1 构建站域电流保护融信度函数

将保护对元件故障识别的支撑度作为保护动作的权重, 再融合各保护动作信息, 可以增大故障元件与非故障元件的区分度, 利用支撑度和保护实际动作值构建站域电流保护融信度函数:

$$\begin{cases} E_R(T) = \sum_1^{N_I} C_{bh-T}^I R_{bh}^I + \sum_1^{N_{II}} C_{bh-T}^{II} R_{bh}^{II} + \sum_1^{N_{III}} C_{bh-T}^{III} R_{bh}^{III} \\ E_R(L_{in}) = \sum_1^{N_I} C_{bh-L_{in}}^I R_{bh}^I + \sum_1^{N_{II}} C_{bh-L_{in}}^{II} R_{bh}^{II} + \sum_1^{N_{III}} C_{bh-L_{in}}^{III} R_{bh}^{III} + \\ \sum_1^{N_I} C_{bh-L_{in}}^I R_{bh}^I + \sum_1^{N_{II}} C_{bh-L_{in}}^{II} R_{bh}^{II} + \sum_1^{N_{III}} C_{bh-L_{in}}^{III} R_{bh}^{III} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $E_R(T)$ 、 $E_R(L_{in})$ 分别为变压器、线路的融信度函数; R_{bh}^I 、 R_{bh}^{II} 、 R_{bh}^{III} 分别为各保护实际动作情况; N_I 、 N_{II} 、 N_{III} 分别为保护 I 段、II 段、III 段的总数目。

3.2 构建站域电流保护融信度期望函数

站域电流保护融信度期望函数为假设故障发生在某元件上时对各保护期望动作情况的融合结果。由于期望保护动作情况与元件故障位置有关, 根据保护对元件的有效保护范围可将元件分成若干个保护区段 D_x , 不同保护区段内对各保护的期望动作情况不同, 在每个保护区段内以支撑度为故障权重计算保护动作融合结果 $H(D_x)$, 再将各保护区段的故

障概率 p_{D_x} 作为该期望融合结果的权重, 最后的融合结果即为元件的融信度期望函数。

以保护 II 对变压器分区为例, 根据保护 g_1 、 z_1 、 d_1 的 II 段对变压器的保护范围(如图 2 中折线虚框所示)将等值变压器分为四个保护区段 D_{T1}^{II} 、 D_{T2}^{II} 、 D_{T3}^{II} 、 D_{T4}^{II} , 各保护 II 段的期望动作值如表 2 所示。

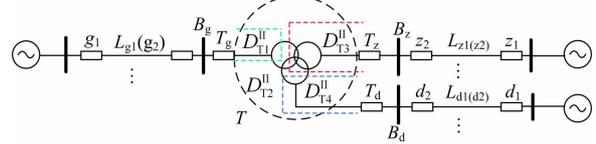


图 2 保护 II 段对变压器元件分区示例

Fig. 2 Zone example of protection II against transformer

表 2 假设各区域内故障期望 II 段动作值

Table 2 Expected action of protection II suppose one zone fault

保护元件	g_1	g_2	T_g	T_z	T_d	z_1	z_2	d_1	d_2
设故障在 D_{T1}^{II}	1	0	1	1	1	0	0	0	0
设故障在 D_{T2}^{II}	0	0	1	1	1	0	0	0	0
设故障在 D_{T3}^{II}	0	0	1	1	1	1	0	0	0
设故障在 D_{T4}^{II}	0	0	1	1	1	0	0	1	0

各保护区段故障概率可根据各 II 段在变压器上的有效保护范围计算:

$$\begin{cases} p_{D_{T1}^{\text{II}}} = Z_{ag1-T}^{\text{II}} / (Z_{T_g} + Z_{T_z} + Z_{T_d}) \\ p_{D_{T3}^{\text{II}}} = Z_{az1-T}^{\text{II}} / (Z_{T_g} + Z_{T_z} + Z_{T_d}) \\ p_{D_{T4}^{\text{II}}} = Z_{ad1-T}^{\text{II}} / (Z_{T_g} + Z_{T_z} + Z_{T_d}) \\ p_{D_{T2}^{\text{II}}} = (1 - Z_{ag1-T}^{\text{II}} - Z_{az1-T}^{\text{II}} - Z_{ad1-T}^{\text{II}}) / (Z_{T_g} + Z_{T_z} + Z_{T_d}) \end{cases} \quad (30)$$

由此可求出变压器故障时 II 段动作信息融合后的融信度期望函数值 $E_H^{\text{II}}(T)$ 为

$$E_H^{\text{II}}(T) = \sum_1^{ND_T^{\text{II}}} (p_{D_{T_x}^{\text{II}}} \sum_1^{N_{II}} C_{bh-T}^{\text{II}} R_{bh-D_{T_x}^{\text{II}}}^{\text{II}}) \quad (31)$$

式中: ND_T^{II} 为根据保护 II 段在变压器上所划分保护区段的个数; $R_{bh-D_{T_x}^{\text{II}}}^{\text{II}}$ 为保护区段 $D_{T_x}^{\text{II}}$ 故障时各保护 II 段的期望动作值。

同理, 可根据保护 I 段对变压器的有效保护范围划分 I 段保护区段, 而各保护 III 段对变压器的有效保护范围覆盖变压器元件, 无需分区。变压器故障时 I 段、III 段动作信息融合后的融信度期望函数值 $E_H^{\text{I}}(T)$ 、 $E_H^{\text{III}}(T)$ 为

$$\begin{cases} E_H^{\text{I}}(T) = \sum_1^{ND_T^{\text{I}}} (p_{D_{T_x}^{\text{I}}} \sum_1^{N_I} C_{bh-T}^{\text{I}} R_{bh-D_{T_x}^{\text{I}}}^{\text{I}}) \\ E_H^{\text{III}}(T) = \sum_1^{N_{III}} C_{bh-T}^{\text{III}} R_{bh}^{\text{III}} \end{cases} \quad (32)$$

式中： ND_I^I 为保护 I 段在变压器元件上所划分保护区段的个数； $R_{bh-D_{Tx}}^{*I}$ 为保护区段 D_{Tx}^I 故障时各保护 I 段的期望动作值； R_{bh}^{III} 为假设变压器元件故障时各保护 III 段的期望动作值。

各保护 I 段、II 段、III 段在线路上也可以根据有效保护范围划分不同的保护区段 $D_{Lin,x}^I$ 、 $D_{Lin,x}^{II}$ 、 $D_{Lin,x}^{III}$ ，个数分别为 ND_{Lin}^I 、 ND_{Lin}^{II} 、 ND_{Lin}^{III} ，各保护区段故障概率分别记为 $p_{D_{Lin,x}^I}^I$ 、 $p_{D_{Lin,x}^{II}}^{II}$ 、 $p_{D_{Lin,x}^{III}}^{III}$ ，可得线路故障时各段动作信息融合后的融信度期望函数值 $E_H^I(L_{in})$ 、 $E_H^{II}(L_{in})$ 、 $E_H^{III}(L_{in})$ 为

$$\begin{cases} E_H^I(L_{in}) = \sum_1^{ND_{Lin}^I} (p_{D_{Lin,x}^I}^I \sum_1^{N_I} (C_{bh-L_{in}}^I + C_{bh-L_{in}}^{*I}) R_{bh-D_{Lin,x}^I}^{*I}) \\ E_H^{II}(L_{in}) = \sum_1^{ND_{Lin}^{II}} (p_{D_{Lin,x}^{II}}^{II} \sum_1^{N_{II}} (C_{bh-L_{in}}^{II} + C_{bh-L_{in}}^{*II}) R_{bh-D_{Lin,x}^{II}}^{*II}) \\ E_H^{III}(L_{in}) = \sum_1^{ND_{Lin}^{III}} (p_{D_{Lin,x}^{III}}^{III} \sum_1^{N_{III}} (C_{bh-L_{in}}^{III} + C_{bh-L_{in}}^{*III}) R_{bh-D_{Lin,x}^{III}}^{*III}) \end{cases} \quad (33)$$

元件的融信度期望函数值即为元件故障时，保护各段动作信息融合后的融信度期望函数值之和：

$$\begin{cases} E_H(T) = E_H^I(T) + E_H^{II}(T) + E_H^{III}(T) \\ E_H(L_{in}) = E_H^I(L_{in}) + E_H^{II}(L_{in}) + E_H^{III}(L_{in}) \end{cases} \quad (34)$$

式中， $E_H(T)$ 、 $E_H(L_{in})$ 分别为变压器、线路的融信度期望函数。

3.3 基于融信因子识别故障

定义元件的站域电流保护融信度函数值与站域电流保护融信度期望函数值之比为该元件的融信因子，计算式如下：

$$\begin{cases} F(T) = \frac{E_R(T)}{E_H(T)} \\ F(L_{in}) = \frac{E_R(L_{in})}{E_H(L_{in})} \end{cases} \quad (35)$$

式中， $F(T)$ 、 $F(L_{in})$ 分别为变压器、线路的融信因子。元件融信因子的值越大表示融信度函数的值与融信度期望函数的值越接近，元件故障的概率最大，故障元件的融信因子应是所有元件融信因子中最大值。因此，判定最大融信因子所对应的元件为故障元件，保护判据为

$$F(y_{j_{\text{fault}}}) = \max(F(T), F(L_{in})) \quad (36)$$

式中， $y_{j_{\text{fault}}}$ 表示故障元件。

4 仿真实验

以一实际变电站数据对算法进行验证，系统结构如图 3 所示。其中，变压器参数：Y/Y/ Δ -12-11，

$S_N=400$ MVA， $U_{1N}/U_{2N}/U_{3N}=220$ kV/110 kV/35 kV。高/中短路阻抗 13.27%，高/低短路阻抗 23.14%，中/低短路阻抗 10.21%。高压侧线路型号为 LGJ-400/50，中压侧线路型号为 LGJ-300/40，低压侧线路型号为 LGJ-185/30。高压侧线路装设距离保护，整定原则及计算方法类似。图中保护 T_g 、 T_z 、 T_d 分别在变压器高、中、低压侧。

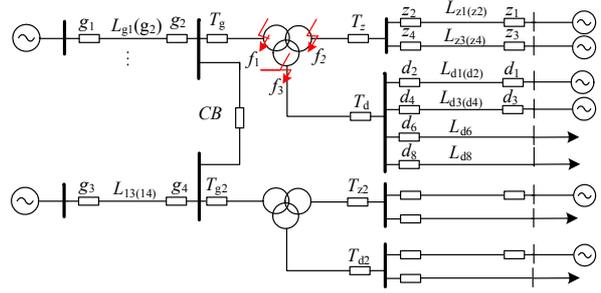


图 3 算例验证系统图

Fig. 3 Network of testing system

4.1 融信因子的计算示例

以 CB 处于合位而变压器高压侧 f_1 处发生故障为例，说明基于电流保护融信因子的站域保护算法。首先根据当前电流整定值计算保护对各元件的有效保护范围，并计算保护各段对元件的支撑度。各段保护对判断变压器元件的支撑度如表 3 所示。

表 3 CB 合位 f_1 故障时保护对变压器支撑度

Table 3 Support degree of protection against transformer when

CB is closed and f_1 fault

保护名称	g_1	g_2	g_3	g_4	z_1	z_2
I 段支撑度	0	0	0	0	0	0
II 段支撑度	0.068 6	0	0.057 2	0	0.147 4	0
III 段支撑度	0.182 4	0	0.184 9	0	0.209 0	0
保护名称	z_3	z_4	d_1	d_2	d_3	d_4
I 段支撑度	0	0	0	0	0	0
II 段支撑度	0.163 3	0	0.130 8	0	0.127 9	0
III 段支撑度	0.223 5	0	0.133 3	0	0.132 6	0
保护名称	d_6	d_8	T_g	T_z	T_d	
I 段支撑度	0	0	1	1	1	
II 段支撑度	0	0	0.354 9	0.514 5	0.414 4	
III 段支撑度	0	0	0.068 4	0.076 0	0.125 4	

然后，根据保护对各元件的有效保护范围，计算各元件保护区段的故障概率及期望保护动作值，再以支撑度作为权重，计算各元件的融信度期望函数值，计算结果如表 4 所示。

将保护对各元件的支撑度作为权重，再借助各保

护实际动作情况(表 5 所示), 计算各元件的融信度函数值, 计算结果如表 6 所示。根据各元件的融信度函数值与融信度函数期望值之比, 得到各元件的融信因子, 计算结果如表 7 所示。变压器元件的融信因子为 0.8750, 是各元件融信因子中的最大值, 因此, 保护将识别其为变压器故障, 跳开相应断路器。

表 4 CB 合位时各元件的融信度期望函数值

Table 4 Fusion reliable expectation function value of each component when CB is closed

元件名称	L_{g1}	L_{g3}	L_{z1}	L_{z3}	L_{d1}
融信度期望函数值	4.6610	4.5070	4.8574	4.7961	4.3629
元件名称	L_{d3}	L_{d6}	L_{d8}	T	
融信度期望函数值	4.3927	3.3501	3.3441	4.2800	

表 5 CB 合位 f_1 故障时各保护实际动作情况Table 5 Actual action of each protection when CB is closed and f_1 fault

保护名称	g_1	g_2	g_3	g_4	z_1	z_2
I 段动作	0	0	0	0	0	0
II 段动作	1	0	1	0	0	0
III 段动作	1	0	1	0	1	0
保护名称	z_3	z_4	d_1	d_2	d_3	d_4
I 段动作	0	0	0	0	0	0
II 段动作	0	0	0	0	0	0
III 段动作	1	0	1	0	1	0
保护名称	d_6	d_8	T_g	T_z	T_d	
I 段动作	0	0	1	0	0	
II 段动作	0	0	1	1	1	
III 段动作	0	0	1	1	1	

表 6 CB 合位 f_1 故障时各元件融信度函数值计算结果

Table 6 Fusion reliable function value of each component when

CB is closed and f_1 fault					
元件名称	L_{g1}	L_{g3}	L_{z1}	L_{z3}	L_{d1}
融信度函数值	1.9985	1.8971	1.8232	1.7755	1.1622
元件名称	L_{d3}	L_{d6}	L_{d8}	T	
融信度函数值	1.1588	0.7905	0.7800	3.7451	

表 7 CB 合位 f_1 故障时各元件融信因子计算结果

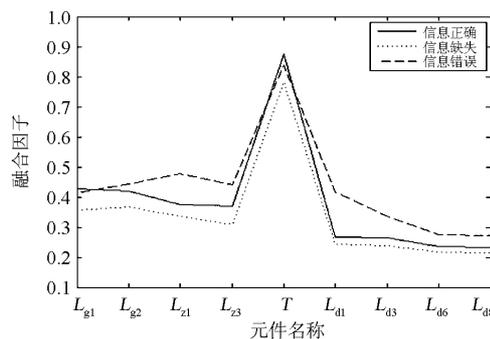
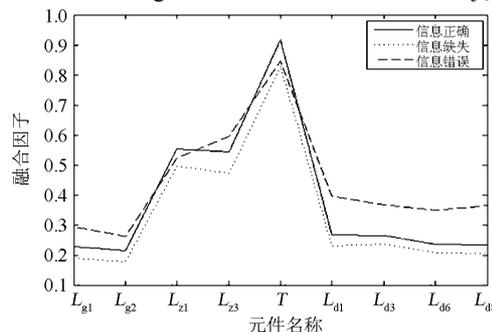
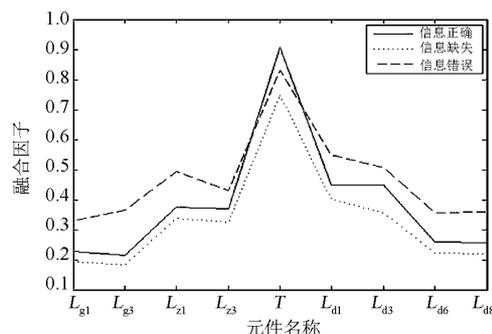
Table 7 Fusion reliable factor of each component when

CB is closed and f_1 fault					
元件名称	L_{g1}	L_{g3}	L_{z1}	L_{z3}	L_{d1}
融信因子	0.4288	0.4209	0.3753	0.3702	0.2664
元件名称	L_{d3}	L_{d6}	L_{d8}	T	
融信因子	0.2638	0.2360	0.2333	0.8750	

4.2 应对信息缺失及错误情况

在 CB 合位且变压器 f_1 、 f_2 和 f_3 , 线路 L_{g3} 、 L_{z3} 和 L_{d6} 出口分别发生故障情况, 随机 7 位信息缺失及信息错误情况时(保护动作信息共 51 位, 畸变率

为 14%), 试验 100 次各元件融信因子的统计平均值如图 4~图 9 所示。可以看出, 在发生信息缺失及错误情况下, 融信因子最大值对应的元件是与设定的故障元件一致, 本方法能正确识别故障元件, 可见算法具有良好的容错性。

图 4 CB 合位 f_1 故障考虑信息缺失及错误情况的融信因子
Fig. 4 Fusion reliable factor of each component considering information missing or error when CB is closed and f_1 fault图 5 CB 合位 f_2 故障考虑信息缺失及错误情况的融信因子
Fig. 5 Fusion reliable factor of each component considering information missing or error when CB is closed and f_2 fault图 6 CB 合位 f_3 故障考虑信息缺失及错误情况的融信因子
Fig. 6 Fusion reliable factor of each component considering information missing or error when CB is closed and f_3 fault

4.3 应对拓扑变化情况

当 CB 变为开位时, 故障发生后保护整定值变化, 各元件的期望函数值也将变化。表 8 给出了各元件的融信度函数值、融信度期望函数值、融信因子计算结果。可以看出, CB 开位 f_1 故障时, 变压器元件的融信因子为 0.9385, 且为最大值, 因此保护将判定变压器是故障元件, 并跳开相应断路器。

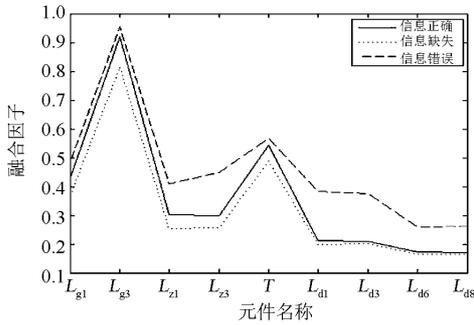


图 7 CB 合位高压侧线路 L_{g3} 出口故障考虑信息缺失及错误情况的融信因子

Fig. 7 Fusion reliable factor considering information missing or error when CB is closed and line g_3 fault

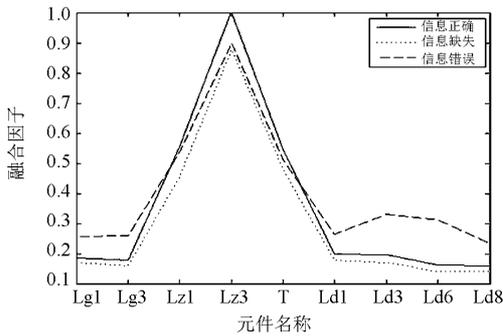


图 8 CB 合位中压侧线路 L_{z3} 出口故障考虑信息缺失及错误情况的融信因子

Fig. 8 Fusion reliable factor considering information missing or error when CB is closed and line z_3 fault

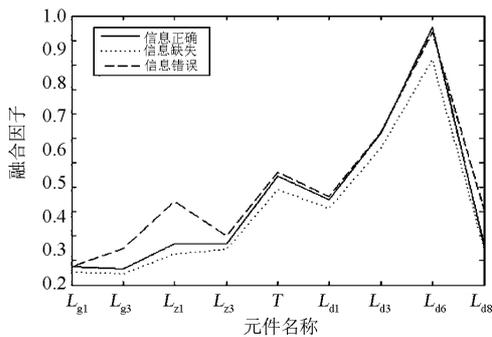


图 9 CB 合位低压侧线路 L_{d6} 出口故障考虑信息缺失及错误情况的融信因子

Fig. 9 Fusion reliable factor considering information missing or error when CB is closed and line d_6 fault

图 10 和图 11 分别给出了 CB 开位时且变压器 f_1 故障、高压线路 L_{g1} 出口故障时, 随机 7 位信息缺失以及信息错误情况下, 试验 100 次各元件融信因子的统计平均值。可以看出, 最大融信因子对应元件为设定的故障元件。因此, 在网络拓扑变化情况下, 保护算法仍能正确识别故障元件, 且有一定容错能力。

表 8 CB 开位 f_1 故障时各元件融信因子计算结果
Table 8 Fusion reliable factor of each component when CB is open and f_1 fault

元件名称	L_{g1}	L_{z1}	L_{z3}	L_{d1}
融信度函数值	1.9946	1.8201	1.7362	1.2375
融信度函数期望值	4.483	4.7905	4.7011	4.386
融信因子	0.4449	0.3799	0.3693	0.2822
元件名称	L_{d3}	L_{d6}	L_{d8}	T
融信度函数值	1.1924	0.8862	0.8744	3.3846
融信度函数期望值	4.394	3.4161	2.5323	3.6065
融信因子	0.2714	0.2594	0.3453	0.9385

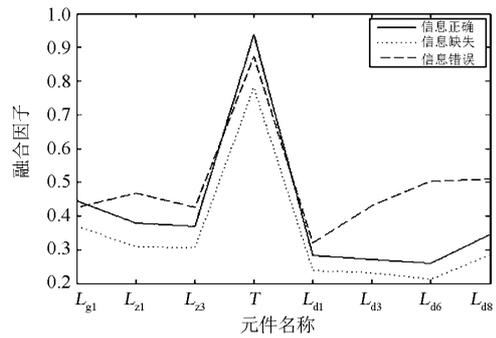


图 10 CB 开位 f_1 故障考虑信息缺失及错误情况的融信因子
Fig. 10 Fusion reliable factor of each component considering information missing or error when CB is open and f_1 fault

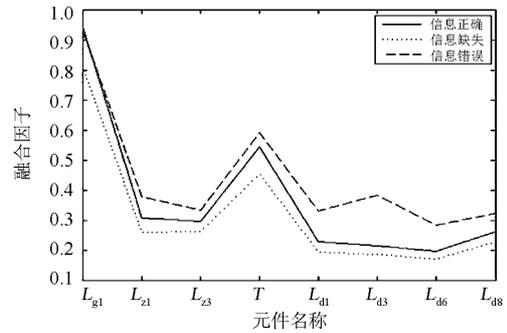


图 11 CB 开位高压侧线路 L_{g1} 出口故障考虑信息缺失及错误情况的融信因子

Fig. 11 Fusion reliable factor considering information missing or error when CB is open and line g_1 fault

5 结论

利用站域保护中电流保护动作信息, 提出了一种基于保护动作信息融合的站域保护方案。该方案具有以下特点:

- (1) 基于自适应电流保护原理, 能够不受系统运行方式、故障类型等因素的影响。
- (2) 量化电流保护对元件的有效保护范围, 计算保护对元件故障识别的支撑度, 更加真实地反应保

护动作与元件故障之间的关系。

(3) 简化传统电流保护上下级之间的配合关系,根据融信因子直接定位故障元件,缩短了后备保护的动作时间。

(4) 充分利用保护动作的冗余信息,能够应对信息缺失和信息错误的情况,具备容错能力。

参考文献

- [1] SCHUMACHER M, HOGA C, SCHMID J. Get on the digital bus to substation automation[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(3): 51-56.
- [2] 吴国昉, 王庆平, 李刚. 基于数字化变电站的集中式保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 15-19.
WU Guoyang, WANG Qingping, LI Gang. Study of centralized protection based on digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 15-19.
- [3] 蔡小玲, 王礼伟, 林传伟, 等. 基于智能变电站的站域保护原理和实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 128-133.
CAI Xiaoling, WANG Liwei, LIN Chuanwei, et al. Principle and realization of substation-area protection based on smart substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(6): 128-133.
- [4] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 智能变电站站域后备保护研究[J]. 华东电力, 2013, 41(5): 947-952.
CHEN Lei, ZHANG Kanjun, XIA Yongjun, et al. Research overview of substation area protection in intelligent substation[J]. East China Electric Power, 2013, 41(5): 947-952.
- [5] 周泽昕, 王兴国, 杜丁香, 等. 一种基于电流差动原理的变电站后备保护[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1113-1120.
ZHOU Zexin, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. A substation backup protection based on current differential protective principle[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1113-1120.
- [6] 高厚磊, 刘益青, 苏建军, 等. 智能变电站新型站域后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 32-38.
GAO Houlei, LIU Yiqing, SU Jianjun, et al. New type of substation-area backup protection for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 32-38.
- [7] 张保会, 周良才. 变电站集中式后备保护[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 1-5.
ZHANG Baohui, ZHOU Liangcai. Centralized substation backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 1-5.
- [8] 胡忠山. 基于站域信息的继电保护组网方案研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
HU Zhongshan. Research on power system protection scheme based on substation area information[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [9] 王媛, 焦彦军. 基于多 Agent 技术的站域保护系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 80-85.
WANG Yuan, JIAO Yanjun. Research on substation-area protection system based on multi-Agent system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 80-85.
- [10] 田聪聪, 文明浩. 具有高信息冗余的广域后备保护系统[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 214-219.
TIAN Congcong, WEN Minghao. A wide-area backup protection system with high information redundancy[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 214-219.
- [11] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [12] 姜宪国, 王增平, 李琛, 等. 区域自治式后备保护分区方案[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 234-241.
JIANG Xianguo, WANG Zengping, LI Chen, et al. Zoning scheme of regional autonomy backup protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 234-241.
- [13] 朱林, 段献忠, 苏盛, 等. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 155-161.
ZHU Lin, DUAN Xianzhong, SU Sheng, et al. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 155-161.
- [14] 和敬涵, 李倍, 刘琳, 等. 基于分布式功能的站域保护[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 26-32.
HE Jinghan, LI Bei, LIU Lin, et al. Station domain protection based on distributed function[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 26-32.
- [15] 葛耀中. 自适应继电保护及其前景展望[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 42-46.
GE Yaozhong. Adaptive protection relay and its prospect of development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 42-46.
- [16] MA Jing, MA Wei, WANG Xi, et al. A new adaptive voltage protection scheme for distribution network with distributed generations[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2013, 36(4): 142-151.
- [17] 孔凡坊, 吴军基, 叶学勇, 等. 自适应电流保护方案的仿真研究[J]. 继电器, 2008, 36(4): 10-14.
KONG Fanfang, WU Junji, YE Xueyong, et al. Research of auto-adaptive current protection simulation[J]. Relay, 2008, 36(4): 10-14.

收稿日期: 2014-05-11; 修回日期: 2014-08-11

作者简介:

马静(1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: hdmajing@aliyun.com

史宇欣(1990-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护方面的研究;

马伟(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统供电恢复、继电保护等方面的研究。

(编辑 张爱琴)