

分布式母线差动保护耐同步误差能力分析

陈雷¹, 高厚磊¹, 樊占峰²

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要:提出了最小同步误差允许裕度角的概念,用于描述分布式母线差动保护判据耐同步误差能力,推导出表征同步误差对差动电流影响程度的相移系数。详细分析了母线结构、电流互感器饱和、制动系数以及不同步单元电流幅值和数量等因素对最小同步误差允许裕度角的影响方式,得出该裕度角的理论分析值。利用 PSCAD/EMTDC 建立了典型结构的母线系统模型,对理论分析进行了全面的仿真验证。验证结果表明,最小同步误差允许裕度角的理论值既可检验现有保护方案中各数据处理环节产生的同步误差是否超出保护承受能力,又可为判断各种同步方案和自同步技术是否符合母线差动保护的要求提供参考。

关键词:分布式母线差动保护;耐同步误差能力;相移系数;最小同步误差裕度角;影响因素

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.030

0 引言

智能变电站中分布式母线差动保护实现就地分散数字化采样^[1-3],数据采样无法做到完全同步;而且对设有冗余配置,并采用“网采网跳”的母线差动保护,由于数据在网络上的传输延时不定,易出现数据不同步问题。目前母线差动保护同步方案主要有 2 类:一类是采用外设或内部同步时钟^[4]实现分布式采样系统各单元间的数据同步,主要有基于全球定位系统(GPS)时钟和基于 IEEE1588 的网络对时方式^[5-7];另一类是利用自同步技术实现数据同步^[8-9]。GPS 对时会失步和同步误差增大的情况;自同步技术也无法做到完全同步。母线差动保护判据本身具有相移制动能力,能够耐受一定的同步误差,但目前未见对其能耐受的同步误差角度的定量分析,也缺少对影响其耐受同步误差能力因素的分析。因此,母线差动保护的耐受同步误差的能力是亟待研究的问题。

目前鲜有母线差动保护耐同步误差能力的研究方法和成果。文献[10]分析了线路差动保护的相移制动能力,但该方法不适用于母线差动保护;文献[11]从采样不同步角度分析了同步误差对母线采样值差动保护的影响,但是缺少对保护判据耐同步误差能力的分析;文献[12]分析了数字化变电站中独立于 GPS 的同步时钟源的必要性,并比较了现有几种同步实现方案的特点,但是没有对各种同步方法可能产生的最大同步误差进行分析。不同于两端线路系统,母线属于多端系统,连接的电气设备复杂多样,且数量不定,差动电流和制动电流的计算要考

虑多端单元,各单元之间数据的相对不同步方向存在差异。相比于线路差动保护,母线差动保护耐受同步误差能力的分析难度大。

本文针对智能变电站分布式母线差动保护的现状和需要解决的实际问题,以普通比率制动特性的双母线结构差动保护为例,提出了同步误差允许裕度角的概念;从被保护母线角度分析了不同步电流的幅值、数量和性质,数据不同步方向,电流互感器饱和以及母线连接结构对同步误差裕度角的影响,从保护判据角度分析了制动系数的影响;推导并定义了相移系数,以表征不同步角度对差动电流的影响程度,并理论推导得到了在单个影响因素以及综合影响因素下,母线差动保护能够耐受的最小同步误差允许裕度角。通过大量的仿真计算,验证了理论分析的准确性,并给出了快速有效确定母线差动保护最小同步误差允许裕度角的方法。

1 母线差动保护最小同步误差允许裕度角

数据不同步在相量中表现为相位角的偏移。为简化分析,先假设电流互感器无传变误差,工作于理想状态。

普通比率制动特性母线差动保护判据为:

$$\begin{cases} \left| \sum_{i=1}^n I_i \right| \geq K \sum_{i=1}^n |I_i| \\ \left| \sum_{i=1}^n I_i \right| \geq I_{\text{set},0} \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_i 为第*i*个单元电流相量; n 为单元总数; K 为制动系数; $I_{\text{set},0}$ 为最小启动门槛。

图 1 为同步误差引起电流相量相移示意图。如图 1(a)所示,当发生母线差动保护区外故障时,流入电流 $I_i (i=1,2,\dots,n-1)$ 和流出电流 I_n 满足 $\sum_{i=1}^{n-1} I_i +$

收稿日期:2017-07-20;修回日期:2018-06-13

基金项目:许继集团科研项目(SGTYHT/14-JS-190)

Project supported by the Science and Technology Program of Xuji Group Corporation(SGTYHT/14-JS-190)

$I_n = 0$ 。如图1(b)所示,当发生母线故障时,忽略无源元件流出的小电流,各电流均流入母线且接近同相位。当第 i 个单元的电流相位角变化 β_i ,恰好使得式(1)所示判据不成立,引起保护不正确动作时,定义该临界值 β_i 为该单元的同步误差允许裕度角,以及 $\beta = \min\{\beta_i | i=1,2,\dots,n\}$ 为保证母线差动保护正确动作的最小同步误差允许裕度角。文中分析的不同步角度范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

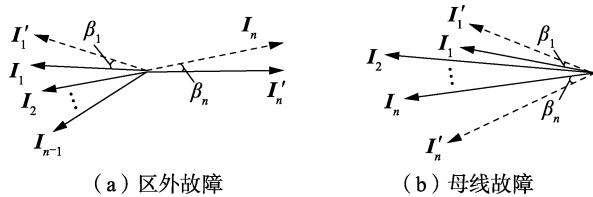


图1 同步误差引起电流相量相移示意图

Fig.1 Schematic diagram of current phase shift caused by synchronization error

2 β 值影响因素分析

2.1 不同步单元电流幅值的影响

定义 $I_{n-} = \sum_{i=1}^{n-1} I_i = I_m + \sum_{i=1, i \neq m}^{n-1} I_i$, 当发生母线差动保护区外故障时,满足 $I_n + I_{n-} = 0$,如图2(a)所示。假设第 m ($m \neq n$)个单元的电流的幅值为 $|I_m|$,与 I_{n-} 的夹角为 α ,则满足式(2)。

$$\begin{cases} |I_m| \sin \alpha - \left| \sum_{i=1, i \neq m}^{n-1} I_i \right| \sin \gamma = 0 \\ |I_m| \cos \alpha + \left| \sum_{i=1, i \neq m}^{n-1} I_i \right| \cos \gamma = |I_n| \end{cases} \quad (2)$$

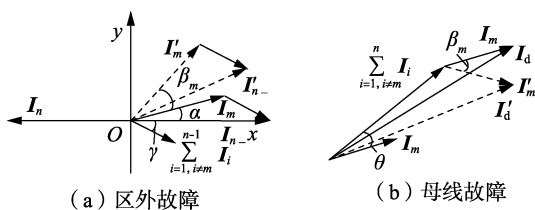


图2 相移分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of phase shift analysis

若因同步误差导致 I_m 相移 β_m 角度,可得 I'_m 以及 I'_{n-} 。差动电流 I_d 沿坐标轴正方向的分量为:

$$\begin{cases} I_{dx} = |I_m| \cos(\alpha + \beta_m) + \left| \sum_{i=1, i \neq m}^{n-1} I_i \right| \cos \gamma - |I_n| \\ I_{dy} = |I_m| \sin(\alpha + \beta_m) - \left| \sum_{i=1, i \neq m}^{n-1} I_i \right| \sin \gamma \end{cases} \quad (3)$$

联合式(2)和(3)可得:

$$I_d = K_d |I_m| \quad (4)$$

其中, $K_d = \sqrt{2-2\cos\beta_m} = 2\sin(\beta_m/2)$ 。

定义相移系数 K_d 表征 β 对 I_d 大小的影响程度。

根据式(1),构造函数:

$$f = I_d - K I_r \quad (5)$$

其中, $I_r = \sum_{i=1, i \neq m}^n |I_i| + |I_m|$ 。

母线差动保护不正确动作的边界条件为 $f=0$,将 I_d 和 I_r 代入式(5)可得:

$$\beta_m = 2 \arcsin[K(1+m_1)/(2m_1)] \quad (6)$$

其中, $m_1 = |I_m| / \sum_{i=1, i \neq m}^n |I_i|$ 。

β 随 m_1 变化的曲线如图3所示。由图可见, β 随着 m_1 的增大而减小,且受其影响变化先快后慢。分析可知, m_1 的取值范围为 $(0,1]$ 。当 m_1 取极端值 $m_1=1$,且 $K=0.25$ 时,由式(6)可得此时的最小同步误差允许裕度角 $\beta \approx 28.9^\circ$ 。

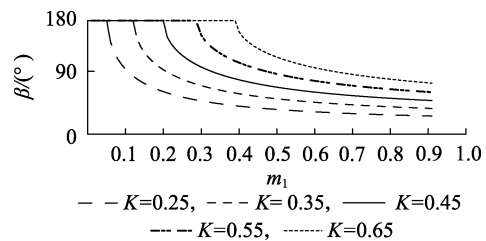


图3 β 随 m_1 变化关系曲线

Fig.3 Curves of relationship between β and m_1

2.2 不同步单元数量和电流性质的影响

发生母线差动保护区外故障时,不同步单元数量的影响要视电流性质分2种情况讨论:一是所有不同步单元电流均流入母线(情况1);二是部分不同步单元的电流流入母线、部分不同步单元的电流流出母线(情况2)。

a. 情况1。

假定有 h ($1 \leq h \leq n-1$)个不同步单元的电流流入母线,分析可得:

$$\begin{cases} I_{dx} = \sum_{i=1}^h |I_i| [\cos(\alpha_i + \beta_i) - \cos \alpha_i] \\ I_{dy} = \sum_{i=1}^h |I_i| [\sin(\alpha_i + \beta_i) - \sin \alpha_i] \end{cases} \quad (7)$$

为简化分析,可令 h 个不同步单元电流初始相位相同,即满足 $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_h = 0^\circ$,则由式(7)可得:

$$I_d = \sqrt{I_{dx}^2 + I_{dy}^2} \quad (8)$$

$$I'_{dx} = \sum_{i=1}^h |I_i| \cos \beta_i - \sum_{i=1}^h |I_i|, \quad I'_{dy} = \sum_{i=1}^h |I_i| \sin \beta_i$$

若相移 $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_h = \beta$ 且相移方向一致,代入式(8)可得:

$$I_d = \sum_{i=1}^h |I_i| \sqrt{\sin^2 \beta + (\cos \beta - 1)^2} = K_d \sum_{i=1}^h |I_i| \quad (9)$$

因各单元电流幅值不变,所以制动电流 I_r 大小不变。将 I_d 、 I_r 代入式(5),令 $f=0$,可得:

$$\beta = 2 \arcsin \left[K I_r / \left(2 \sum_{i=1}^h |I_i| \right) \right] \quad (10)$$

可知 β 与 h 呈负相关,即电流流入母线的不同步单元数量 h 越大, β 值越小。当取极端值 $h=n-1$ 时, $I_r / \sum_{i=1}^h |I_i| = 2$, 取 $K=0.25$, 由式(10)计算可得最小同步误差允许裕度角 $\beta \approx 28.9^\circ$ 。且只有第 n 个流出单元不同步和流入不同步单元数量 h 取极端值时,会得到相同的 β 值。

b. 情况 2。

假定有 $h(0 \leq h \leq n-1)$ 个不同步单元电流流入母线,流出母线不同步单元电流为 I_n 。同情况 1 的分析,可得:

$$I_d = \sqrt{I_{dx}^2 + I_{dy}^2} \quad (11)$$

$$I_{dx} = \sum_{i=1}^h |I_i| \cos \beta_i - \sum_{i=1}^h |I_i| - |I_n| (\cos \beta_n - 1)$$

$$I_{dy} = \sum_{i=1}^h |I_i| \sin \beta_i - |I_n| \sin \beta_n$$

令 $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_h = \beta_n = \beta$ 且不同步方向一致,代入式(11)可得:

$$I_d = \left(|I_n| - \sum_{i=1}^h |I_i| \right) \sqrt{2 - 2 \cos \beta} = K_d \left(|I_n| - \sum_{i=1}^h |I_i| \right) \quad (12)$$

将 I_d 、 I_r 代入式(5),并令 $f=0$,可得:

$$\beta = 2 \arcsin \left[K I_r / 2 \left(|I_n| - \sum_{i=1}^h |I_i| \right) \right] \quad (13)$$

由式(13)可知, β 与 h 呈正相关。即当不同步单元电流包含流出单元电流 I_n 时,流入单元不同步数量 h 越多, β 值越大,母线差动保护可耐受更大的不同步角度,与情况 1 中的结论相反。

当取极端值 $h=0$ 时,有 $I_r / |I_n| = 2$, 取 $K=0.25$, 由式(13)计算可得极端情况下最小同步误差允许裕度角 $\beta \approx 28.9^\circ$ 。

2.3 不同步方向的影响

在 2.2 节中,假定所有不同步单元的相移方向一致。若 h 个不同步单元中有 $q(0 \leq q \leq h)$ 个不同步单元的相移方向与之相反,并假设所有不同步单元相移角为 β 、电流幅值为 $|I|$, 则 2.2 节中的情况 1 经求解可得:

$$I_d = |I| \sqrt{4h^2 \sin^2(\beta/2) + K_{q1} \sin^2 \beta} \quad (14)$$

其中, $K_{q1} = 4q(q-h)$ 。

当 $q=0$ 或 $q=h$ 时,结论与 2.2 节情况 1 分析一致。当 $0 < q < h$ 时, β 值增大,且有:当 $0 < q < h/2$ 时,随

着 q 增大, β 值增大幅度增加;当 $h/2 < q < h$ 时,随着 q 增大, β 值增大幅度减小。

对 2.2 节中的情况 2,经求解可得:

$$I_d = (|I_n| - h|I|) \sqrt{4 \sin^2(\beta/2) + K_{q2} \sin^2 \beta} \quad (15)$$

其中, $K_{q2} = 2q|I| / (|I_n| - h|I|)$ 。

由式(5)、(15)可知,当 $0 < q < h$ 时, q 越大, β 越小。

2.2、2.3 节所得结论对不同步单元的电流幅值不相等和相移角度大小不一致的情况同样成立。

2.4 制动系数 K 的影响

发生区外故障时,由式(6)可得 β 、 K 的关系为:

$$\beta = 2 \arcsin \frac{K I_r}{2 |I_m|} \quad (16)$$

β 随 K 变化的曲线如图 4 中实线所示。可见,发生区外故障时, β 与 K 呈正相关。当 I_m 为故障线路单元电流时,有最小值 $I_r / |I_m| = 2$, 取 $K=0.25$, 由式(16)计算可得最小同步误差允许裕度角 $\beta \approx 28.9^\circ$ 。

发生母线故障时(见图 2(b)), β 与 K 的关系为:

$$\beta = \arccos \frac{I_r^2 K^2 - [|I_m|^2 + (I_r - |I_m|)^2]}{2 |I_m| (I_r - |I_m|)} \quad (17)$$

β 随 K 变化的曲线呈图 4 中虚线所示。由图可见,发生母线故障时, β 与 K 呈负相关。当取最小值 $I_r / |I_m| = 2$, 且 $K=0.7$ 时,由式(17)计算可得最小同步误差允许裕度角 $\beta \approx 91.1^\circ$ 。

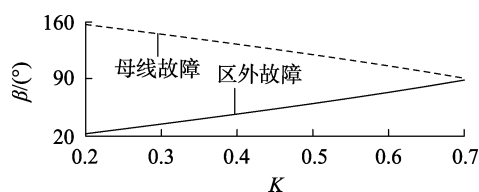


图 4 β 随 K 变化的曲线

Fig.4 Curves of β vs. K

2.5 母线结构的影响

对于单母线、单母分段、双母线、双母线单分段、双母线双分段等母线结构,当采用式(1)所示判据的母线差动保护时,母线差动保护仅受与该段母线相连的线路单元、变压器单元、母联断路器单元以及分段断路器单元电流的影响,而与母线结构无关。

采用 3/2 断路器接线方式的母线,它的保护相当于 2 组单母线保护,发生母线故障时可能会有部分故障电流流出母线。由 2.4 节可知,发生母线故障时,差动保护具有很强的抗拒动能力,能承受约 91° 的不同步角,远大于发生区外故障时所能承受的不同步角 28.9° ,且流出的故障电流只会降低制动特性原理的母线差动保护的灵敏度,不会引起保护误动作。因此,母线差动保护耐同步误差能力与母线

结构无关。

2.6 电流互感器饱和的影响

电流互感器饱和一般发生在电流幅值较大的故障线路单元中,饱和使得电流幅值减小,相位超前。

假设 $|I'_n| = r|I_n|$ (r 为电流互感器饱和后与饱和前电流幅值的比值), 相位偏移角度为 ϕ , 线路发生故障时电流互感器饱和影响分析示意图如图 5 所示。则由图 5 可得差动电流为:

$$I_d = |I_n| \sqrt{(1-r \cos \phi)^2 + (r \sin \phi)^2} = |I_n| \sqrt{1+r^2-2r \cos \phi} \quad (18)$$

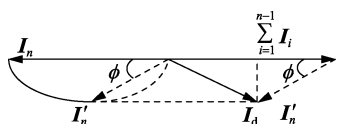


图5 线路发生故障时电流互感器饱和影响分析

Fig.5 Effect analysis of CT saturation when fault occurs on transmission line

a. 饱和单元的同步误差允许裕度角分析。

当 $r=1$ 时, $I_d = K_d |I_n|$, 同 2.1 节分析可知, 引起保护误动作的临界 ϕ 值即为最小同步误差允许裕度角。

当 $r \neq 1$ 时, 因不能确定 r 和 $\cos \phi$ 的变化规律以及两者之间关系, 只作定性分析: 随着饱和程度的增大, r 的减小会使得差动电流幅值急剧增大、制动电流幅值减小, 导致很小的饱和单元不同步角就能引起母线差动保护误动作, 从而降低了因采样不同步、网路数据设备等各处理环节产生的同步误差允许裕度角。

b. 非饱和单元的同步误差裕度角分析。

根据 2.2 节的分析可知, 故障单元饱和导致相位超前, 会增大非故障单元超前的同步误差允许裕度角, 降低滞后的同步误差允许裕度角。

现有的母线保护装置均安装防止电流互感器饱和和误动作措施, 在发生母线区外故障且电流互感器饱和时能可靠闭锁, 同时在发生区外故障转换为区内故障时, 能保证母线差动保护快速开放、正确动作。所以母线差动保护耐受同步误差能力可以忽略电流互感器饱和的影响。

2.7 各影响因素的综合分析

根据 2.1—2.6 节进行的分析, 不考虑母线结构和电流互感器饱和, 对各影响因素进行综合分析。

a. 考虑电流幅值影响的极端条件, 即式 (6) 中 $m_1 = 1$ 时, 可得:

$$\beta = 2 \arcsin K \quad (19)$$

b. 考虑不同步单元数量和电流性质的影响时, 2.2 节中情况 1 的极端条件是 $h = n-1$, 情况 2 的极端条件是 $h = 0$, 此时式 (10) 和式 (13) 均可转变为式 (19)。

c. 考虑 K 值影响时, 极端条件为 $I_r / |I_m| = 2$, 此时式 (16) 亦可转化为式 (19)。当 K 取最小值 $K = 0.25$ 时, 计算得 $\beta \approx 28.9^\circ$, 受智能变电站采样频率 4 kHz 限制, 可得分布式母线差动保护能耐受 6 个采样点的不同步角度, 即最小同步误差允许裕度角为:

$$\beta = 27^\circ \quad (20)$$

综上所述, 在各影响因素取极端值时, 均有式 (19) 所示形式。仔细分析可以发现, 当某一因素取极端值的同时, 其他各因素也相应取极端值, 才得到式 (19), 所以 $\beta = 27^\circ$ 是考虑各种因素最不利条件下的综合分析结果。

3 仿真实验

利用 PSCAD 搭建如图 6 所示的 220 kV 双母线模型进行仿真分析, 采用智能变电站 4 kHz 采样频率。

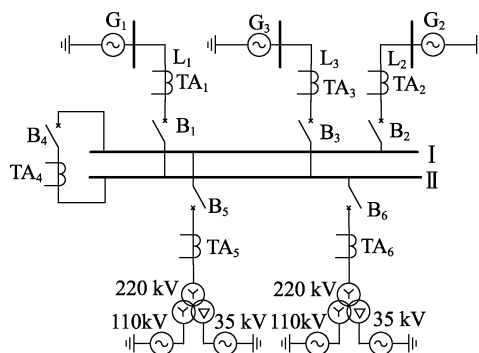


图6 220 kV 双母线仿真模型

Fig 6 Simulation model of 220 kV system with double-bus

a. 电源参数: $Z_{G1} = Z_{G2} = 4.61 + j52.70 \Omega$, $Z_{G3} = 5.07 + j52.65 \Omega$, $E_{G1} = 230 \angle 20^\circ$ kV, $E_{G2} = 230 \angle 25^\circ$ kV, $E_{G3} = 230 \angle 10^\circ$ kV。

b. 线路参数: L_1 、 L_2 、 L_3 线路长度分别为 37、45、67 km, $r_1 = 0.03576 \Omega/\text{km}$, $l_1 = 1.616 \text{ mH}/\text{km}$, $c_1 = 0.0104 \mu\text{F}/\text{km}$, $r_0 = 0.363 \Omega/\text{km}$, $l_0 = 4.211 \text{ mH}/\text{km}$, $c_0 = 0.00739 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

c. 变压器参数: $U_{1N}/U_{2N}/U_{3N} = 220 \text{ kV}/100 \text{ kV}/35 \text{ kV}$, $S_{N1} = S_{N2} = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

3.1 母线结构的影响

在图 6 所示结构的基础上, 各连接单元参数不变, 只改变母线结构, 搭建如图 7 所示的双母线单分段和单母线结构仿真模型。

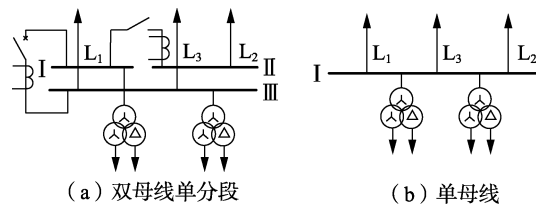


图7 双母线单分段结构和单母线结构

Fig.7 Structures of double bus single segment connection mode and single bus mode

本文除进行 K 对 β 的影响分析时 K 取不同值,其他情况下 $K=0.25$ 。当线路 L_3 发生 AB 两相接地故障时,表 1 给出了 2 种结构下各段母线分差动保护的 β_i 值,表 2 给出了 3 种结构下母线总差动保护的 β_i 值。由表 1 和表 2 可知,母线结构对 β 值没有影响。

表 1 不同结构下各段母线分差动保护的 β_i 值

Table 1 Value of β_i of each bus under different structures				
不同步单元	双母线 $\beta_i/(^\circ)$		双母线单分段 $\beta_i/(^\circ)$	
	A 相	B 相	A 相	B 相
TA ₁	94.5(Ⅱ)	99.0(Ⅱ)	94.5(Ⅱ)	99.0(Ⅱ)
TA ₂	36.0(Ⅰ)	36.0(Ⅰ)	31.5(Ⅱ)	31.5(Ⅱ)
TA ₃	31.5(Ⅱ)	31.5(Ⅱ)	31.5(Ⅲ)	31.5(Ⅲ)
TA ₄	36.0(Ⅰ)	36.0(Ⅰ)	36.0(Ⅰ)	36.0(Ⅰ)

注:Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别表示相应结构下求得 β_i 值的母线段。

表 2 不同结构下母线总差动保护的 β_i 值

Table 2 Value of β_i of whole bus differential protection under different structures						
不同步 单元	双母线 $\beta_i/(^{\circ})$		双母线单 分段 $\beta_i/(^{\circ})$		单母线 $\beta_i/(^{\circ})$	
	A 相	B 相	A 相	B 相	A 相	B 相
TA ₁	94.5	99	94.5	99	94.5	99
TA ₂	90.0	90	90.0	90	90.0	90
TA ₃	31.5	27	31.5	27	31.5	27

3.2 不同步电流幅值大小的影响

流出单元 TA₃ 电流幅值大于流入单元 TA₁,对比表 1 中 TA₁ 和 TA₃ 对应的 β 值可知,对于不同单元,电流幅值越大,对应的同步误差允许裕度角越小。

同一单元电流幅值大小的影响如图 8 所示,由图 8 可见,随着 TA₁ 一次电流幅值的增大,该单元的不同步误差允许裕度角逐渐减小。

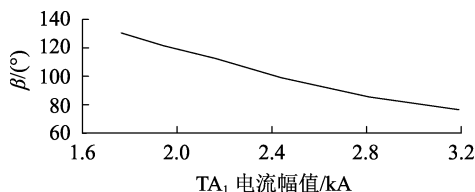


图 8 TA₁ 单元 β 值与电流幅值的关系

Fig.8 Relationship between β and current amplitude of TA₁

不同步单元数量的增多,可等效为一个单元电流幅值的增大。根据表 3 分析可知,不同步单元幅值的大小对 β 值的影响满足图 3 所示曲线关系:幅值增大, β 值骤减,之后变化平缓。

表 3 不同步单元不包含流出单元时不同步单元数量对 β 的影响

Table 3 Influence of number of asynchronous units excluding diffuent unit on β

不同步单元	$\beta/(^\circ)$	不同步单元	$\beta/(^\circ)$
TA ₁	140.0	TA ₁₂₄₅	36.0
TA ₁₂	58.5	TA ₁₂₄₅₆	31.5
TA ₁₂₄	45.0		

注:TA₁₂表示 TA₁ 和 TA₂,其他类似。

3.3 不同步单元的电流性质、数量和方向的影响

由 3.1 节可知, β 与母线结构无关,采用图 9 所示的多单元单母线结构分析 β 与不同步单元的电流性质、数量和方向的关系,以线路 L_3 出口发生 AB 两相接地故障为例,对 2 种情况进行分析。

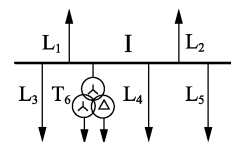
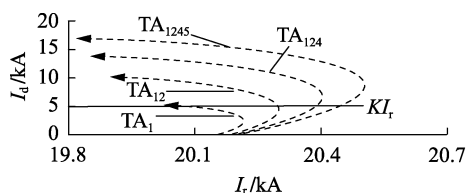


图 9 单母线多连接单元结构

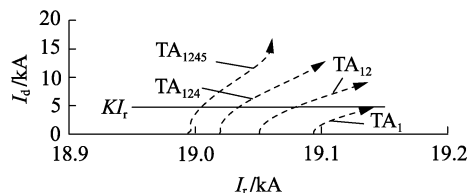
Fig.9 Structure of single bus with multi-connection units

a. 当不同步单元不包含故障线路 L_3 ,且相移方向一致时, β 与不同步单元数量的关系如表 3 所示。

图 10 为不同步角从 0° 变化到 180° 时,含有不同单元的 I_d-I_r 曲线。各曲线与直线 KI_r 的交点对应的角度即为 β ,显然,不同步单元数量越多, β 越小,与表 3 共同验证了 2.2 节对情况 1 的分析是正确的。



(a) A 相



(b) B 相

图 10 不同步角从 0° 变化到 180° 时不同步单元数量对应的差动特性

Fig.10 Differential characteristics corresponding to asynchronous unit number when asynchronous angle changes from 0° to 180°

使所有流入单元不同步,并改变某些单元的不同步方向,得到的 β 值如表 4 所示。

表 4 流入电流单元反方向不同步时不同步单元数量对 β 的影响

Table 4 Influence of asynchronous number on β when direction of asynchronous influent unit is opposite

不同步单元	$\beta/(^\circ)$	不同步单元	$\beta/(^\circ)$
TA ₁₂₄₆₅	36.0	TA ₄₁₂₅₆	45.0
TA ₁₂₄₅₆	45.0	TA ₁₂₄₅₆	31.5
TA ₁₄₂₅₆	58.5		

注:下划线表示对应单元的不同步方向与表 3 相反,后同。

表 4 表明,当不同步单元不包含故障线路时, β 会随着反方向的不同步单元数量的增加先增大后减小,与 2.3 节的分析完全一致。

b. 当不同步单元包含故障线路 L_3 ,且各单元相移

方向一致时, β 与不同步单元数量的关系如表 5 所示。

表 5 不同步单元包含流出单元时不同步单元数量对 β 的影响

Table 5 Influence of asynchronous unit number on β when asynchronous units include diffuent unit

不同步单元	$\beta/(\circ)$	不同步单元	$\beta/(\circ)$
TA ₃	31.5	TA ₁₋₄	103.0
TA ₁₃	41.0	TA ₁₋₅	—
TA ₁₋₃	58.0	TA ₁₋₆	—

注:“—”表示 β 超出 180° , 后同。

由表 5 分析可知, 当电流流出的故障线路单元 L₃ 不同步时, 流入的不同步单元越多, β 越大, 母线差动保护的耐同步误差能力越强, 与 2.2 节对情况 2 的分析结论一致。

保持 TA₃ 的不同步方向不变, 逐渐改变其他各单元的不同步方向。此时, TA₃ 与相反方向不同步单元的不同步角之和即为 β 。流出单元不同步时, 反方向流入不同步单元数量对 β 的影响见表 6, 随着反方向不同步单元数量的增加, 同步误差允许裕度角减小, 验证了 2.2 节和 2.3 节理论分析的正确性。

表 6 流出单元不同步时流入单元反方向不同步数量对 β 的影响

Table 6 Influence of number of opposite direction asynchronous influent units on β when diffuent unit is also asynchronous

不同步单元	$\beta/(\circ)$	不同步单元	$\beta/(\circ)$
TA ₁₋₆	—	TA ₁₋₃₄₅₆	63
TA ₁₋₅₆	—	TA ₁₃₂₄₅₆	45
TA ₁₋₄₅₆	108	TA ₃₁₂₄₅₆	27

3.4 制动系数 K 值的影响

基于图 6, 设置母线 I 发生 AB 两相接地故障, K 值变化范围为 0.3~0.7, 母联单元 TA₄ 不同步, 母线 I 和母线 II 故障相不正确动作的临界角度如表 7 所示。

表 7 母线故障时 K 值对 β 的影响

Table 7 Influence of K on β when bus breaks down

K	母线 I $\beta/(\circ)$			母线 II $\beta/(\circ)$		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0.3	157.5	162.0	99.0	36.0	36.0	—
0.4	144.0	148.5	—	49.5	45.0	—
0.5	126.0	135.0	—	63.0	63.0	—
0.6	103.5	121.5	—	76.5	76.5	—
0.7	90.0	103.5	—	90.0	90.0	—

设置线路 L₃ 发生 AB 两相接地故障, 使 TA₄ 单元不同步, 得到母线保护不正确动作临界角度如表 8 所示。

表 7 和表 8 中母线和线路故障时母线 I 的 A 相不正确动作角度随 K 变化的情况与图 4 完全相符, 从而验证了 2.4 节分析的准确性。

从 2.4 节分析可知, 发生母线故障时, 在极端不

利情况下, 保护仍有很强的抗拒动能力, 因此 β 值由

表 8 线路故障时 K 值对 β 的影响

Table 8 Influence of K on β when transmission line breaks down

K	母线 I 的 $\beta/(\circ)$			母线 II 的 $\beta/(\circ)$		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0.3	36.0	36.0	99.0	81.0	81.0	—
0.4	49.5	49.5	—	117.0	117.0	—
0.5	63.0	63.0	—	—	—	—
0.6	76.5	76.5	—	—	—	—
0.7	90.0	90.0	—	—	—	—

线路故障时决定。由 2.1—2.7 节分析可知, 决定 β 值的极端条件, 可等效为电流幅值最大的故障线路单元发生不同步。对双母线以及分段母线结构, 当 1 条或 1 段母线故障时, 该故障对于非故障母线段属于外部故障, 且一般情况下, 母联单元或者分段单元电流幅值最大, 所以 β 值由非故障母线差动保护决定, 可由表 7 仿真结果验证。当线路故障时, 与故障线路直接相连的母线分差动保护, 其 β 值取决于故障线路单元不同步; 与故障线路非直接相连的母线分差动保护, 其 β 值取决于电流幅值较大的母联单元或者分段单元不同步, 表 1、表 8 结果可验证该结论。

4 结论

为正确评估分布式母线差动保护耐同步误差能力, 本文提出了最小同步误差允许裕度角的概念。在对影响最小同步误差允许裕度角的各种因素进行全面分析的基础上, 得到了该裕度角的理论值; 同时通过建立 220 kV 双母线结构仿真模型, 验证了本文分析结果的正确性。最小同步误差允许裕度角可用于判断因采样不同步、互感器传变特性以及网络数据设备等各数据处理环节产生的同步误差是否在保护正确动作的允许误差范围之内, 亦可检验各种同步方案, 尤其是采用自同步方法的母线差动保护能否达到同步要求。

对采用总差动和各段母线分差动保护方式的双母线以及母线分段等结构, 本文给出了快速确定保护耐同步误差角度的方案, 为母线保护设计人员及现场运行人员提供实用性参考。

参考文献:

- [1] 邹贵彬, 王晓刚, 高厚磊, 等. 新型数字化变电站分布式母线保护[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 94-97.
ZOU Guibin, WANG Xiaogang, GAO Houlei, et al. Distributed busbar protection of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 94-97.
- [2] 陈福锋, 俞春林, 张尧, 等. 变电站继电保护就地化整体解决方案研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 204-210.
CHEN Fufeng, YU Chunlin, ZHANG Yao, et al. Research on integrated solution of on-site substation relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 204-210.

- [3] 葛遗莉,葛慧,鲁大勇. 数字化变电站设计、运行中面临的问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):113-117.
GE Yili, GE Hui, LU Dayong. Problems in design and operation of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12):113-117.
- [4] 操丰梅,宋小舟,秦应力. 基于数字化变电站过程层的分布式母线保护的研制[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):69-72.
CAO Fengmei, SONG Xiaozhou, QIN Yingli. Research on distributed busbar protection based on digital substation process level[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4):69-72.
- [5] 雷霆,李斌,黄太贵. 220 kV 变电站 GPS 时间同步系统实现技术[J]. 电力自动化设备,2007,27(11):71-74.
LEI Ting, LI Bin, HUANG Taigui. Implementation of GPS synchronization system in 220 kV substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11):71-74.
- [6] 刘巍,熊浩清,石光,等. IEEE1588 时钟同步系统应用分析与现场测试[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):127-131.
LIU Wei, XIONG Haoqing, SHI Guang, et al. Application analysis and field test of IEEE1588 clock synchronization system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2):127-131.
- [7] 史先好,高厚磊,向珉江,等. IEEE1588 时钟同步协议在数字化变电站中的应用探讨[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):132-135.
SHI Xianhao, GAO Houlei, XIANG Minjiang, et al. Application of IEEE1588 time synchronization protocol in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4):132-135.
- [8] 占捷文,刘宏君,潘军军,等. 基于电压向量的数字化母线保护电流同步方法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(20):129-134.
ZHAN Jiewen, LIU Hongjun, PAN Junjun, et al. Sampling synchronization method based on voltage vector for busbar differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20):129-134.
- [9] 雷明,王文森,康小宁,等. 不受非同步采样影响的母线差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(22):96-101.
LEI Ming, WANG Wensen, KANG Xiaoning, et al. Research on the busbar differential protection scheme immune to asynchronous sample data[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22):96-101.
- [10] 朱国防,陆于平. 线路差动保护的相移制动能力研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(10):84-90.
ZHU Guofang, LU Yuping. Studies on phase shift restraint capacity of feeder current differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10):84-90.
- [11] 汪思满,周小波,唐治国,等. 智能变电站中自适应同步的母线保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(3):61-65.
WANG Siman, ZHOU Xiaobo, TANG Zhiguo, et al. Adaptive synchronization busbar protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3):61-65.
- [12] 刘慧源,郝后堂,李延新,等. 数字化变电站同步方案分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):55-58.
LIU Huiyuan, HAO Houtang, LI Yanxin, et al. Research on a synchronism scheme for digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3):55-58.
- [13] 唐治国,汪思满,康丰,等. 多级级联分布式母线保护方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):136-141.
TANG Zhiguo, WANG Siman, KANG Feng, et al. Multilevel cascading solution for distributed busbar protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11):136-141.
- [14] 国家电网公司. 智能变电站技术导则:Q/GDW 383—2009[S]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [15] 周斌,黄国方,王耀鑫,等. 在变电站智能设备中实现 B 码对时[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):86-88.
ZHOU Bin, HUANG Guofang, WANG Yaixin, et al. Time synchronization with IRIG-B code in substation IED[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9):86-88.

作者简介:



陈雷

陈雷(1991—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为智能变电站母线保护(E-mail:sdu_chenlei@sina.com);

高厚磊(1963—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:houleig@sdu.edu.cn);

樊占峰(1974—),男,吉林白城人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:13937416180@139.com)。

Analysis of synchronization error enduring capacity of distributed bus-bar current differential protection

CHEN Lei¹, GAO Houlei¹, FAN Zhanfeng²

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The concept of the minimum synchronization error allowing angle is proposed to describe the synchronization error enduring capacity of the distributed bus-bar current differential protection, and the phase shift coefficient representing the impact of synchronization error on the difference current is deduced. The influencing factors of the minimum synchronization error allowing angle, i.e. bus structure, current transformer saturation, restraint coefficient, asynchronous unit number and amplitude of asynchronous currents are analyzed in detail, by which the theoretical value of the minimum synchronization error allowing angle is deduced. The PSCAD/EMTDC-based models of bus-bar systems with typical structure are built to verify the theoretical analysis. The theoretical value of the minimum synchronization error allowing angle can test whether the synchronization error generated by each data processing part in the protection scheme exceeds the enduring capacity of the protection and provide a reference for judging whether the synchronization schemes and bus protection schemes adopting self-synchronization technology meet the requirements of bus-bar current differential protection.

Key words: distributed bus-bar current differential protection; synchronization error enduring capacity; phase shift coefficient; minimum synchronization error allowing angle; influencing factors