

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211480

基于电压突变量的差动保护同步方法研究

朱征¹, 黄冰飞², 邹晓峰¹, 姜琳², 韦岩阳²

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200437; 2. 上海欣能信息科技发展有限公司, 上海 200025)

摘要: 随着基于无线通道的配网差动保护被引入配电网, 需要解决的关键技术之一即是两端故障数据的同步问题。基于保护启动时刻电压突变量的同步方法可以在不增加额外设备的情况下实现数据同步, 但对该方法的同步精度和适用范围尚缺乏必要的理论分析和验证。通过叠加原理研究了多相故障情况下基于电压突变量的差动保护同步原理, 并进一步分析了故障启动门槛、采样频率、故障初始角、谐波和各侧装置采样时刻不同对同步误差的影响, 并进行了相关模拟仿真测试。结果表明, 取 5% 的电压额定值作为启动门槛, 采用每周波 240 点采样, 能确保各侧装置在线路多相故障时启动时刻的同步误差小于 30°, 从而满足配网差动保护的同步要求。

关键词: 差动保护; 电压突变量; 同步

A synchronization method of differential protection based on sudden change of voltage

ZHU Zheng¹, HUANG Bingfei², ZOU Xiaofeng¹, JIANG Lin², WEI Yanyang²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China;

2. Shanghai Shineenergy Information Technology Development Co., Ltd., Shanghai 200025, China)

Abstract: With the introduction of wireless channel-based distribution differential protection into the distribution network, one of the key techniques to be developed is the synchronization of fault data at both ends. The method of synchronization based on the voltage surge at the time of protection activation can achieve data synchronization without adding additional equipment. However, there is a lack of the necessary theoretical analysis and verification of the synchronization accuracy and applicability of this method. In the paper, the synchronization principle of differential protection based on voltage mutation under multiphase fault conditions is studied using the superposition principle. The effects of different fault initiation threshold, sampling frequency, fault initial angle, harmonics and sampling moment of each side device on the synchronization error are further analyzed. A simulation test is carried out through ATP modeling, and the results show that taking 5% of the voltage rating as the starting threshold and using 240 sampling points per wave can ensure that the starting synchronization error of each side device is less than 30°, thus satisfying the synchronization requirement of distribution network differential protection.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52094020000Y).

Key words: differential protection; voltage sudden change; synchronization

0 引言

差动保护具有固有的选择性^[1], 已广泛应用于主网线路保护。随着分布式能源的逐步推广, 在“3060”双碳目标下, 分布式能源建设进入井喷模

式后, 提升配网保护选择性迫在眉睫。将线路差动保护应用于配网是提升保护选择性的有效手段。

线路差动保护要求两侧采样同步, 并通过高速通道将采样值传送到对侧^[2-6]。主网线路结构简单, 线路差动保护通常采用专用光纤或复用 SDH^[7-10]信道进行点对点通信。专用光纤或复用 SDH 信道路径固定, 双向传输时延相同, 采用乒乓原理测定通道时延, 经时延补偿调整从机侧采样时刻, 可以实现

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(52094020000Y); 国网上海市电力公司科技项目资助(52094019006B)

各侧差动保护同步采样^[2]。

配网网架结构复杂, 改造频繁, 无法采用点对点光纤通信。无线通信技术, 特别是 4G 专网^[11-12]和 5G^[13-18]通信技术的发展, 通信带宽和传输速率已基本满足差动保护的相关要求, 但其双向传输时延不一致, 无法通过乒乓原理^[2]实测通道单向时延, 各侧差动保护装置无法通过时延补偿实现同步采样。部分厂家开发了基于外部同步脉冲的配网差动保护, 但其可靠性依赖于外部时钟^[19-21]; 部分学者研究了不依赖于外部时钟的同步方案, 如电流故障数据自同步原理^[22-23]。对于区内故障, 要求线路两侧均有电源提供故障电流, 并且同步误差受电源大小、不同故障角等影响较大, 适用性相对较差。

本文研究了用故障电压突变量确定故障启动时刻的可行性, 包括分析其启动灵敏度、采样频率、故障初始角、谐波和各侧装置采样时刻不同对启动同步误差的影响, 并进行了相关模拟仿真测试。

1 原理

故障分量下的等效电路如图 1 所示, 其中 E 为故障点反向叠加电压, 其值大小等于该点故障前的电压取反, Z_f 为故障点接地等效阻抗, Z_{sm} 、 Z_{sn} 、 Z_{lm} 、 Z_{ln} 分别为故障点两侧的系统等效阻抗和线路等效阻抗。

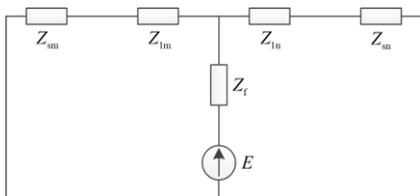


图 1 故障分量下的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram under fault component

考虑经过渡电阻短路的相间故障, 在弧光电阻上的压降不大于额定电压的 5%, 则故障点接地等效阻抗 Z_f 为两侧系统等效阻抗 Z_s 的 1/19, 如式(1)所示。

$$Z_f = \frac{Z_s}{19} \quad (1)$$

故障点的电压为

$$\Delta U_f = E \times \frac{Z_s}{Z_s + Z_f} = 0.95E \quad (2)$$

式中, $Z_s = (Z_{sm} + Z_{lm}) // (Z_{sn} + Z_{ln})$ 。

对于相间故障, 按弧光电阻压降为 5% 的额定电压校核灵敏度, 线路在变电站出口处的电压突变量最小, 测量点 m 的电压突变量为

$$\Delta U_m = \Delta U_f \times \frac{Z_{sm}}{Z_{sm} + Z_{lm}} \quad (3)$$

设启动门槛为 U_{set} , 启动判据为

$$|\Delta u(t)| > U_{set} \quad (4)$$

式中, $U_{set} = \beta \times E$, β 为启动系数。

2 误差分析

2.1 启动门槛引起的误差

令故障初始相角为 θ , m 侧变电站母线电压突变量瞬时值为

$$\Delta u_m(t) = \frac{Z_{sm}}{Z_{sm} + Z_{lm}} \times 0.95E \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 得

$$\left| \frac{Z_{sm}}{Z_{sm} + Z_{lm}} \right| \times 0.95 |\sin(\omega t + \theta)| > \beta \quad (6)$$

同理, 从变电站出口到故障点之间 k ($0 < k < 1$) 倍处的电压突变量启动判据为

$$\left| \frac{Z_{sm} + kZ_{lm}}{Z_{sm} + Z_{lm}} \right| \times 0.95 |\sin(\omega t + \theta)| > \beta \quad (7)$$

由式(6)可知, 测量点离故障点越远, Z_{lm} 越大, 出口处电压启动元件灵敏度越低。取 110 kV 变电站主变容量为 31.5 MVA, 短路比为 16.7, 对应的短路阻抗为 $0.475j \Omega$ 。为了简化计算, 系统侧视为无穷大电源, 系统阻抗归算为变压器阻抗, 取 $Z_{sm} = 0.5j \Omega$ 。取 10 kV 架空线路每公里的单位阻抗为 $Z_l = 0.118 + 0.314j \Omega$ 。在架空线路 12.755 km 处, 即 $Z_{lm} = 1.492 + 4.005j \Omega$ 处发生金属性故障, 故障初始角 $\theta = 0^\circ$, 变电站出口处电压变化量波形如图 2 中红色曲线所示。图中蓝色、绿色曲线分别对应 k 为 0.05 和 0.1 处的电压变化量波形。

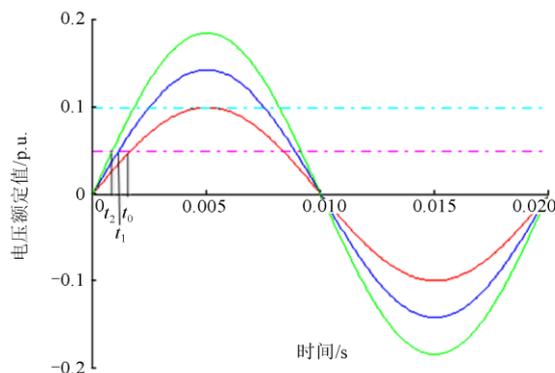


图 2 不同故障点的电压突变波形

Fig. 2 Voltage sudden change waveforms at different fault points

假设采样频率无穷大，且电压变化量一个采样点大于启动值即进入启动态。若取启动门槛为 10% 的额定电压，线路始端在 0.005 s 时刚好可以启动，对应角度为 90°。k = 0.05 处对应的启动时刻角度为 31.76°，线路始端和距离始端 0.638 km 处装置的启动时刻角度差为 58.24°。k = 0.1 处对应的启动时刻角度为 20.93°，线路始端和距离始端 1.276 km 处装置的启动时刻角度差为 69.07°。上述角度差均大于 30°，不符合差动保护对采样同步误差的要求^[17]。

若取启动门槛为 5% 的额定电压，线路始端对应的启动角为 30°，k = 0.05 对应的启动时刻角度为 20.54°，线路始端和距离始端 0.638 km 处装置的启动时刻角度差为 9.46°；k = 0.1 对应的启动时刻角度为 15.68°，线路始端和距离始端 1.276 km 处装置的启动时刻角度差为 14.32°。上述角度差符合差动保护对采样同步误差的要求。

求故障初始角 $\theta = 0^\circ$ 时，不同启动系数、不同长度时线路两侧启动角度差为

$$\Delta\theta(\beta, k) = \frac{180}{\pi} \left(\arcsin\left(\frac{\beta}{0.95} \left| \frac{Z_{sm} + Z_{lm}}{Z_{sm} + kZ_{lm}} \right|\right) - \arcsin\left(\frac{\beta}{0.95} \left| \frac{Z_{sm} + Z_{lm}}{Z_{sm}} \right|\right) \right) \quad (8)$$

图 3 为不同启动系数和线路分段长度时电压启动角度差，其中横轴对应不同 k，纵轴为线路分段两侧启动角度差。由上而下的 9 条曲线对应启动系数从 0.09 到 0.01。由上述曲线可知：同一灵敏系数下，随着 k (即线路分段长度) 的增加，线路分段两侧的启动角度差趋于稳定；线路分段较长的情况下 (k > 0.2)，两侧装置的启动角度差主要由启动系数决定，系数越小，角度差越小， $\beta = 0.05$ ，即使 k = 1，两侧启动角度差也才 27.29°。

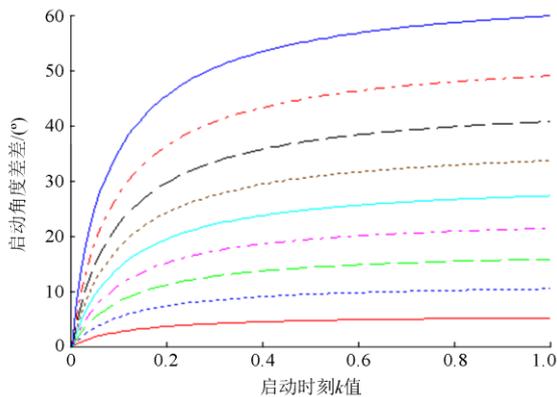


图 3 不同启动系数和线路分段长度时的启动角度差
Fig. 3 Different starting angles with different starting coefficients and line segment lengths

2.2 故障初始角引起的误差

将式(4)离散化，即

$$|\Delta u_k| > U_{set} \quad (9)$$

为防止干扰引起电压突变量误启动，设定电压突变量连续三点大于启动门槛后才确认故障发生，并将连续三点启动的第一点对应的时刻取为故障发生时刻。

同样取 $Z_{sm} = 0.5j \Omega$ 、 $Z_{lm} = 1.492 + 4.005j \Omega$ ，令故障初始角为 150°，不同 k 值下的离散电压突变量曲线如图 4 所示。

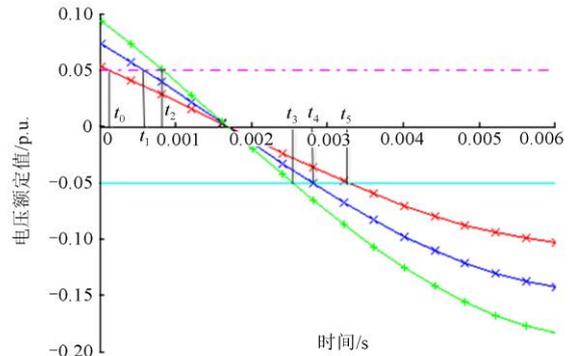


图 4 离散电压突变量曲线

Fig. 4 Discrete voltage sudden change waveforms

取 5% 的额定电压为启动门槛，当 $\theta = 150^\circ$ 时，虽然发生故障，但此时突变量数值小于启动门槛，需等到 0.004 s 时才满足启动条件(蓝色)，根据上述设计条件，确认 t_5 为故障发生时刻。k = 0.1 处对应的启动元件，在 t_2 处满足启动条件(绿色)，根据上述设计条件，确认 0 s 时为故障发生时刻。若不采取辅助判据把关，导致同步误差大于 60°。

如将判据改为连续三点 $|\Delta u_k| > U_{set}$ ，且各侧连续三点的 Δu_k 符号相同，取各侧 $|\Delta u_k| > U_{set}$ 的第 1 点对应的时刻为故障启动时刻，可以消除由于故障初始角不同引起各侧启动不一致导致的同步误差。

2.3 采样离散误差

离散采样会引起线路两侧装置电压启动时刻的同步误差，本文称之为采样离散误差。采样频率越高，采样离散误差越小。如图 2 所示的电压变化量波形，假设采样频率无穷大，即采样间隔 $T_s \rightarrow 0$ ，线路始端在 t_0 处启动，线路分段 (k = 0.05) 末端装置在 t_1 处启动，两侧装置的采样时刻误差为 $t_0 - t_1$ 。降低采样频率，即 T_s 相对较大，线路分段 (k = 0.05) 末端装置在 $t_1 + \delta$ 处启动，但线路始端启动的采样时刻为 $t_1 - \delta + T_s$ ，两侧装置的采样时刻误差为 $t_0 - t_1 - 2\delta + T_s$ ，由此可得采样离散误差基本等同于

采样间隔 T_s 。

2.4 谐波引起的误差

由于故障瞬间有大量的高次谐波, 实际应用中, 加低通滤波器滤除高次谐波, 以消除其对电压启动元件的影响。

低通滤波器包括保护装置采样回路的 RC 滤波、数字低通滤波器等。故障电压在加低通滤波器前后的波形如图 5 所示。

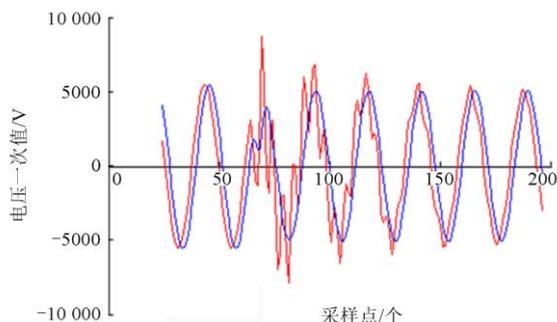


图 5 故障电压加低通滤波器前后波形图

Fig. 5 Fault voltage waveforms with and without low-pass filter

图 5 中红色曲线为未经低通滤波器滤波的故障电压波形, 含有大量的 5 次谐波。蓝色曲线为经低通滤波器滤波后的故障电压波形。对滤波前后的电压用傅立叶变换进行频谱分析, 其基波和 5 次谐波随时间变换的结果如图 6 所示。

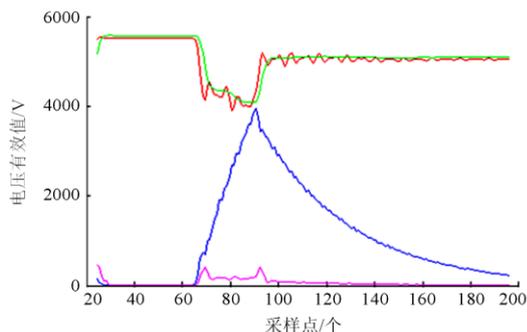


图 6 故障电压频谱分析图

Fig. 6 Spectrum analysis diagram of fault voltages

图 6 中红色、绿色曲线分别为滤波前后的基波有效值, 两者之间差别不大; 蓝色和粉红色曲线为滤波前后的 5 次谐波有效值, 故障后一周波内, 滤波前的 5 次谐波几乎和基波有效值一样大, 但经滤波后, 5 次谐波不到基波有效值的 4%, 对启动判据的影响几乎可以忽略不计。

3 仿真测试

3.1 仿真模型

用 ATP 建模仿真, 仿真模型如图 7 所示。

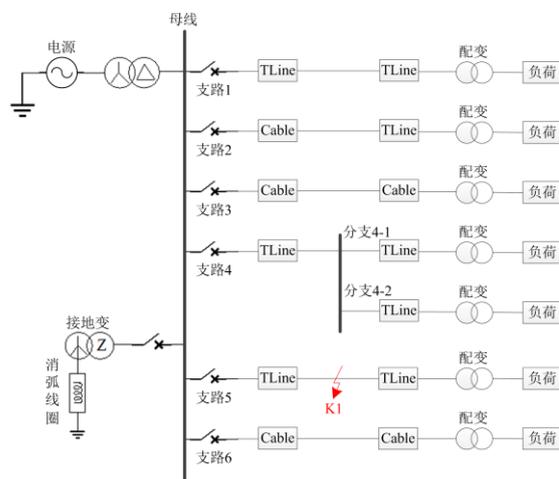


图 7 仿真模型

Fig. 7 Simulation model

用无穷大电源模拟 110 kV 系统; BCT 模型模拟 110 kV 主变, 主变容量为 31.5 MVA, 短路比为 16.7, 对应的短路阻抗为 $0.475j \Omega$; 母线上挂了 6 条不同长度的线路, 有架空、电缆和混合线路。取 10 kV 架空线路每千米参数 $Z_1 = 0.118 + 0.314j \Omega$; 10 kV 电缆线路每千米 $Z_1 = 0.024 + 0.0509j \Omega$; 中性点经消弧线圈接地; 母线电压经 RC 滤波器输出; 支路 5 为被测线路, 分段 1 和分段 2 的总阻抗为 8.5 倍的系统阻抗, 折合为 11.215 km, 支路 5 分段 1 末端电压也经 RC 滤波器输出。过渡电阻取 0.237Ω , 模拟弧光电压为 5% 的额定电压。

由 2.1 节分析结果可知, 启动门槛越低, 由此引起的同步误差越小, 考虑门槛太低容易引起误启动, 本方案拟采用 5% 的额定电压作为启动门槛。由 2.4 节分析可知, 采用低通滤波器后能滤除大部分高次谐波, 其对启动判据的影响基本可以忽略不计。因此仿真测试主要集中于不同采样频率和不同故障初始角对同步误差的影响。

3.2 采样离散误差测试

采样离散误差的测试涉及两个方面: 首先是如何模拟两侧装置在同一采样频率下采样时刻不一致引起的误差; 其次再测试不同采样频率对同步误差的影响。

对于采样时刻不一致的模拟, 可以将 ATP 以每周波 2400 点输出, 模拟 24 点采样时, 变电站出口侧取原始输出的第 $n \times 100$ (其中 n 为自然数) 点数据作为采样值。线路分段末端电压取原始输出的第 $(n \times 100 + k)$ 点数据作为采样值, 其中 k 依次取 $-50 \sim 49$ 的整数, 相当于以 $T_s = 0.00833$ 的颗粒度模拟了两侧采样时刻不一致对同步误差的影响。

变电站出口处 3 个相间电压突变量波形如图 8 所示，红色、蓝色和绿色曲线分别对应 AB、BC 和 CA 相间电压，500 和 -500 为对应的启动门槛。3 个相间电压突变量对应的启动时刻分别为第 67、70、73 个采样点。

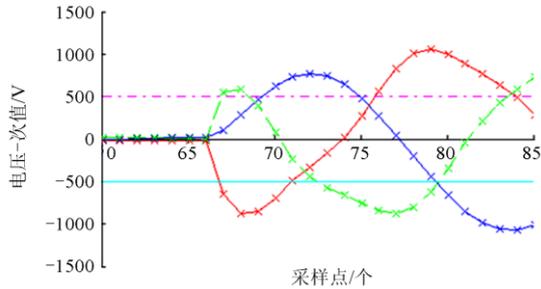


图 8 每周波 24 点采样下的变电站出口电压波形图
Fig. 8 Substation outlet voltage waveforms at 24 sampling points per cycle

长度为 3 km 和 1 km 的线路分段末端电压启动时刻分别如图 9 和图 10 所示。

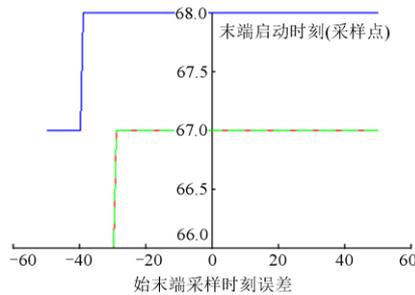


图 9 每周波 24 点采样分段长度 3 km 处电压启动时刻
Fig. 9 Starting time at section length of 3 km at 24 sampling points per cycle

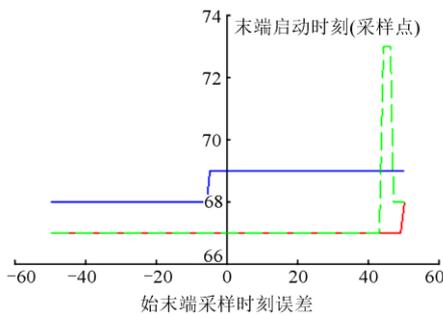


图 10 每周波 24 点采样分段长度 1 km 处电压启动时刻
Fig. 10 Starting time at section length of 1 km at 24 sampling points per cycle

图中横轴为末端采样时刻和始端采样时刻之间的误差，0 对应两侧在同一时刻采样，-20 表示末端比始端早 0.2 个采样间隔，否则为晚 0.2 个采样间

隔，纵轴为启动时刻的采样点。由图 9 可以看出，三相最快的为末端相对超前情况下的采样时刻，最快启动时刻为第 66 采样点，比始端最快时刻快 1 个采样点，对应 15°。若线路分段长度缩短到 1 km，大部分情况两侧同一时刻启动，当末端滞后采样时，最大启动时刻误差为一个采样点，对应 15°。

若采用 24 点采样，比较 3 km 和 1 km 线路分段长度两侧的不同步误差最大为 2 个和 1 个采样间隔，无法体现是采样点的量化误差，还是两侧装置采样时刻不同对最终启动同步的影响大。为此，提高采样频率到每周波 240 点，进行类似的仿真，如图 11—图 13 所示。

变电站出口处 3 个相间电压突变量对应的启动时刻分别为第 667、691、721 个采样点，如图 11 所示。

图 12、图 13 分别表示长度为 3 km 和 1 km 的线路分段末端电压启动时刻，随着两侧装置采样时刻偏差逐步由超前向滞后变化，电压启动时刻逐步往后。其中横轴为末端采样时刻和始端采样时刻之间的误差，纵轴为启动时刻的采样点，对于 3 km

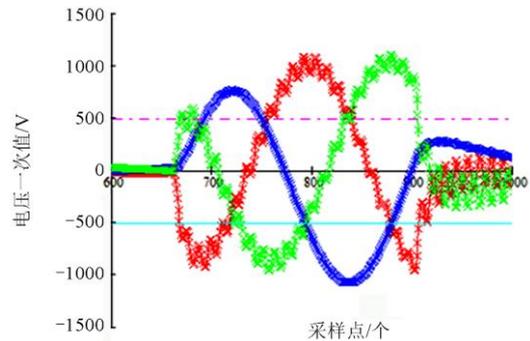


图 11 每周波 240 点采样变电站出口电压波形图
Fig. 11 Substation outlet voltage waveforms at 240 sampling points per cycle

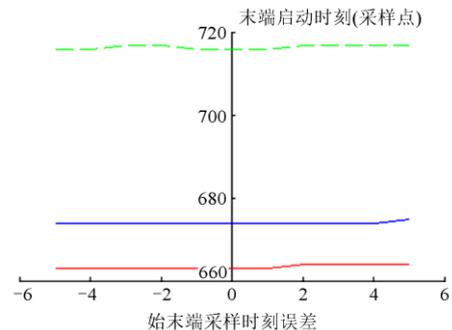


图 12 每周波 240 点采样分段长度 3 km 处电压启动时刻
Fig. 12 Starting time at section length of 3 km at 240 sampling points per cycle

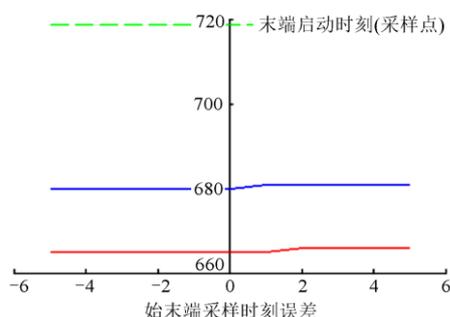


图 13 每周波 240 点采样分段长度 1 km 处电压启动时刻

Fig. 13 Starting time at section length of 1 km at 240 sampling points per cycle

线路分段, 最快启动时刻在 663 采样点处, 两侧最大误差为 4 个采样点, 对应 6° 。对于 1 km 线路分段, 最快启动时刻在 665 采样点处, 两侧最大误差为 2 个采样点, 对应 3° 。若末端采样点滞后, 两侧同步误差减少 1 个采样点。

3.3 故障初始角误差测试

采用每周波 240 点采样, 对线路分段为 3 km 的线路, ABC、BCG、BC 3 类故障, 从故障初始角接近于 90° 开始, 以 18° 为步长进行 30 次仿真, 测试线路分段两端的同步误差如表 1 所示, 表中第 1 行表示故障角度为 $90^\circ + n \times 18^\circ$, 其中 n 为表中 0~9 的数值。第 2 到 4 行, 表示仿真的最大启动误差, 1 个采样误差对应的角度误差为 1.5° 。

表 1 不同故障角各种故障两侧同步误差

Table 1 Synchronization errors on both sides of various faults with different fault angles

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ABC	3	4	4	4	4	4	4	4	5	4
BC	4	4	10	11	16	16	13	6	5	4
BCG	4	4	10	11	16	16	13	6	5	4

测试显示, 对于三相故障, 两侧最大同步误差为 5 个采样点, 对应 7.5° 。对于两相或两相接地故障, 电压瞬时值较大时发生故障, 两侧最大同步误差最小只有 4 个点, 对应 6° ; 随着故障瞬间电压瞬时值逐步减小, 两侧同步误差逐步增大, 最大有 16 个点, 对应 24° , 符合理论分析。

4 结论

线路差动保护以线路两侧的电压突变量启动时刻作为同步基准, 其误差主要与启动灵敏度和采样频率相关。启动灵敏度由系统线路阻抗比和启动门槛决定, 对于线路系统阻抗比大于 8.5 的故障, 若启动门槛设置为 5% 的额定电压, 线路两侧电压启

动最大角度差为 27.29° 。采样频率越大, 量化误差越小, 每周波 240 点采样对应最大量化误差为 1.5° 。采用每周波 240 点采样, 用 5% 的额定电压作为电压突变量启动门槛, 线路两侧装置的启动时刻可作为线路差动保护的同步基准。对于压变 PT 断线情况下的同步方案, 有待于进一步研究。对于有源配电网中由大量电力电子化的设备产生的宽频带振荡, 当前突变量启动元件的适应性问题仍然需要进一步研究。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 数字电流差动保护中几种采样同步方法[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 46-49, 53. GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Several sampling synchronization methods in digital current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 46-49, 53.
- [3] 陆以群, 许建德. 新型数字电流差动保护装置中的数据采样同步和通信方式[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(4): 23-26. LU Yiqun, XU Jiande. A new scheme of sampling synchronization & communication for digital current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(4): 23-26.
- [4] 金华锋, 叶红兵, 凌昉, 等. 复用通道误码和延时对线路纵差保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 63-66, 84. JIN Huafeng, YE Hongbing, LING Fang, et al. The impact of bit error and transmission delay of multiplex channel on line current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 63-66, 84.
- [5] 王芊, 金华锋, 石铁洪, 等. 用于差动保护的 E1 速率通信接口[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 55-57. WANG Qian, JIN Huafeng, SHI Tiehong, et al. Research of E1 interface used in current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 55-57.
- [6] 金华锋, 余荣云, 朱晓彤, 等. 线路纵联保护中双向复用段倒换环动态时延特性[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 65-70. JIN Huafeng, YU Rongyun, ZHU Xiaotong, et al. Research on dynamic transmission delay of bidirectional multiplex section switching ring used for line pilot relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 65-70.
- [7] 王爱玲, 陈新南, 刘捷, 等. RCS-900 系列保护装置与 2048kbit/s 复用通道时钟的配合[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 94-98. WANG Ailing, CHEN Xinnan, LIU Jie, et al. Coordination in communication clock for RCS-900 serial protection

- and 2048 kbit/s multiplex channel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 94-98.
- [8] 韦乐平. 光同步数字传送网[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998.
- [9] 毛谦. SDH 光传送网的保护倒换[J]. 光通信研究, 1994(1-2): 30-39.
MAO Qian. Protection switching of SDH optical transport network[J]. Research on Optical Communication, 1994(1-2): 30-39.
- [10] 王爱玲, 蔡敏, 金华锋, 等. RCS-900 系列保护装置的同步通信时钟[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 53-56.
WANG Ailing, CAI Min, JIN Huafeng, et al. Clock setting for synchronous communication of RCS-900 serial protection equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 53-56.
- [11] 徐溯. 电力无线4G专网的研究与设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
XU Su. Research and design of electric wireless 4G private network[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [12] 黄维芳, 金鑫, 文安, 等. 基于 4G 无线通信的自适应分布式差动保护系统[J]. 电器与能效管理技术, 2017(6): 47-50.
HUANG Weifang, JIN Xin, WEN An, et al. Adaptive distributed differential protection system based on 4G wireless communication[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(6): 47-50.
- [13] 毛玉欣, 陈林, 游世林, 等. 5G 网络切片安全隔离机制与应用[J]. 移动通信, 2019(10): 31-37.
MAO Yuxin, CHEN Lin, YOU Shilin, et al. 5G network slicing security isolation mechanism and application[J]. Mobile Communication, 2019(10): 31-37.
- [14] CELIK A, TETZNER J, SINHA K, et al. 5G device-to-device communication security and multipath routing solutions[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 102-126.
- [15] 赵福川, 刘爱华, 周华东. 5G 确定性网络的应用和传送技术[J]. 中兴通信技术, 2019, 25(5): 62-67.
ZHAO Fuchuan, LIU Aihua, ZHOU Huadong. Applications and transmission technology of 5G deterministic network[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 62-67.
- [16] 王常玲, 赵元. 基于 5G 承载网的电力差动保护业务时延抖动分析[J]. 通信世界, 2019, 32: 33-36.
WANG Changling, ZHAO Yuan. Delay jitter analysis of power differential protection based on 5G carrier network[J]. Word of Communication, 2019, 32: 33-36.
- [17] 蒋帅, 沈冰, 李仲青, 等. 5G 通信技术在配电网保护中的应用探讨[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(5): 39-44.
JIANG Shuai, SHEN Bing, LI Zhongqing, et al. Application of 5G communication technology in distribution network protection[J]. Electric Power ICT, 2021, 19(5): 39-44.
- [18] 陈宏山, 徐舒, 李正红, 等. 计及 5G 通信异常工况的有源配电网快速综合保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 159-168.
CHEN Hongshan, XU Shu, LI Zhenghong, et al. A new fast comprehensive protection scheme of an active distribution network considering the abnormal operating conditions of 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 159-168.
- [19] 向珉江, 袁通, 苏善诚, 等. 基于 5G 授时的配网差动保护数据同步方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 8-15.
XIANG Minjiang, YUAN Tong, SU Shancheng, et al. 5G timing base data synchronization scheme for differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 8-15.
- [20] 张建雨, 姜睿智, 李俊刚, 等. 基于 5G 通信的配电网差动保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 17-23.
ZHANG Jianyu, JIANG Ruizhi, LI Jungang, et al. Research on differential protection of a distribution network based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 17-23.
- [21] 赵艾萱, 黄杨, 宋戈, 等. 5G 独立组网模式下的配网保护配置策略及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 24-31.
ZHAO Aixuan, HUANG Yang, SONG Ge, et al. Configuration strategy and application of distribution network protection based on standalone 5G[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 24-31.
- [22] 李娟, 高厚磊, 武志刚, 等. 有源配电网差动保护自同步原理及误差分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 78-85.
LI Juan, GAO Houlei, WU Zhigang, et al. Data self-synchronization method and error analysis of differential protection in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 78-85.
- [23] 徐丙垠, 王敬华, 王亮, 等. 利用故障信号自同步实现闭环网络故障定位的方法: 中国, CN102981103A[P]. 2013-03-20.

收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2022-02-10

作者简介:

朱征(1966—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: zhuz@sh.sgcc.com.cn

黄冰飞(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网运行与控制; E-mail: huang_bingfei@sh.sgcc.com.cn

邹晓峰(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: unisamuel@hotmail.com

(编辑 许威)