

基于同步电压相量的故障定位新方法

王波¹, 江全元¹, 陈晓刚^{1,2}, 曹一家¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 杭州市电力局, 浙江省杭州市 310009)

摘要: 提出一种利用同步电压相量进行输电网络故障定位的新方法。该方法首先运用对称分量法和线性叠加原理建立故障后的附加正序网络并且定义了故障点的匹配指标,进而基于该指标运用遍历搜索方法寻找故障点位置。该算法仅利用电压相量进行计算,因而能避免因电流互感器饱和导致的误差影响,且仅需少量的同步相量测量单元配置。基于PSCAD的仿真实验表明该方法能够有效地定位任意电网结构的短路故障,并且不受故障类型、过渡电阻等因素的影响。

关键词: 故障定位; 同步电压相量; 附加正序网络; 对称分量法

中图分类号: TM773

0 引言

在短路故障发生后及时、准确地定位故障点位置并迅速地组织抢修,可有效地提高电网的运行安全性和供电可靠率^[1-3]。因此,对于输电线路故障定位方法的研究具有非常重要的工程价值和现实意义。

随着同步相量测量技术的成熟,国内外专家、学者对基于同步相量的输电线路故障定位方法进行了深入的研究,提出了多种故障定位原理和方法,如阻抗法^[4-6]、仿真匹配法^[7-9]等。但是,这些方法存在下列问题:

1)需要电流相量参与计算。由于故障发生时,电流互感器极易达到饱和,其将导致采样波形发生畸变,进而不能正确地反映真实故障电流,因此,会给基于工频量的故障测距造成很大的误差^[10]。

2)需要配置较多数量的同步相量测量单元(PMU)。对某一电网结构,只有当每条线路的两端均配置有PMU或间隔一个母线配置时,才能够有效地定位故障位置^[11]。但是受费用约束,目前尚不可能如此高密度地配置PMU。因此,如何在配置较少数量PMU的情况下,对某一电网结构进行故障定位仍是值得进一步研究的问题。

针对上述问题,本文提出一种基于同步电压相

量的故障定位新方法。对于任意电网结构,假定已知电网的正序参数^[12],该方法仅利用母线同步电压相量进行故障定位,且只需少量的PMU配置。仿真实验表明该方法能够有效地定位故障的发生位置,且不受故障类型、过渡电阻等因素的影响。

1 基于同步相量测量技术的故障定位算法

1.1 基本原理

当三相对称线路发生故障时,可根据对称分量法和线性叠加原理,将故障电力网络分解为故障前的正常状态网络与故障后的附加正序网、附加负序网和附加零序网;而对于三相对称故障,不存在负序网和零序网;对于不对称非接地型故障,不存在零序网;但对所有的故障类型,均存在正序网络。因此,本文仅利用附加正序网络进行故障定位,可有效避免对电网故障前运行状态和故障类型的考虑。

某一含 n 节点的电力网络,假设短路故障发生于传输线路 $i-j$ 距母线 i 为 xL_{ij} 处, L_{ij} 为线路 $i-j$ 的长度,且 $0 \leq x \leq 1$,附加正序网络如图1所示。

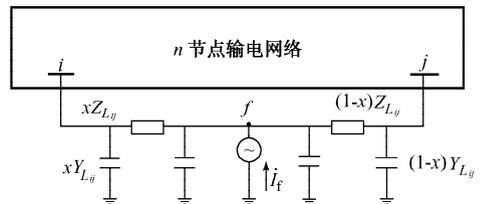


图1 附加正序网络

Fig. 1 Superimposed network of positive sequence

在该附加正序网中,仅故障点有注入电流源 \dot{I}_f ,且传输线路均采用 π 模型。在故障前,对原 n 节点的电网可建立 n 阶常数正序节点导纳矩阵 \mathbf{Y}_{pre} :

收稿日期: 2008-07-28; 修回日期: 2009-02-13。
国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2004CB217902); 国家自然科学基金资助项目(50507018, 50677062, 50595414, 60421002); “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A01); 教育部科学技术研究重大项目(305008); 新世纪优秀人才(NCET-07-0745)支持计划; 浙江省自然科学基金资助项目(R107062)。

$$\mathbf{Y}_{\text{pre}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在故障后,将故障点 f 看做一个新的节点,令其为第 $n+1$ 节点,亦可对全网建立 $n+1$ 阶正序节点导纳方程 \mathbf{Y}' ,其具体形式如下:

$$\mathbf{Y}' = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \mathbf{0} \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii}' & \cdots & Y_{ij}' & \cdots & Y_{in} & Y_{i(n+1)'} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \mathbf{0} \\ Y_{j1} & \cdots & Y_{ji}' & \cdots & Y_{jj}' & \cdots & Y_{jn} & Y_{j(n+1)'} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \mathbf{0} \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & Y_{nn} & 0 \\ 0 & \mathbf{0} & Y_{(n+1)i}' & \mathbf{0} & Y_{(n+1)j}' & \mathbf{0} & 0 & Y_{(n+1)(n+1)'} \end{bmatrix} \quad (2)$$

第 $n+1$ 节点的加入使得原导纳矩阵中节点 i 与节点 j 相关元素发生变化,其变化规则如下:

$$\begin{cases} Y_{ii}' = Y_{ii} - \frac{Y_{L_{ij}}}{2} - \frac{1}{Z_{L_{ij}}} + \frac{xY_{L_{ij}}}{2} + \frac{1}{xZ_{L_{ij}}} \\ Y_{i(n+1)'} = -\frac{1}{xZ_{L_{ij}}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Y_{ij}' = Y_{ji}' = Y_{ij} + \frac{1}{Z_{L_{ij}}} \\ Y_{j(n+1)'} = -\frac{1}{(1-x)Z_{L_{ij}}} \end{cases} \quad (4)$$

$$Y_{jj}' = Y_{jj} - \frac{Y_{L_{ij}}}{2} - \frac{1}{Z_{L_{ij}}} + \frac{(1-x)Y_{L_{ij}}}{2} + \frac{1}{(1-x)Z_{L_{ij}}} \quad (5)$$

$$Y_{(n+1)(n+1)'} = \frac{xY_{L_{ij}}}{2} + \frac{1}{xZ_{L_{ij}}} + \frac{(1-x)Y_{L_{ij}}}{2} + \frac{1}{(1-x)Z_{L_{ij}}} \quad (6)$$

式中: $Z_{L_{ij}}$ 及 $Y_{L_{ij}}$ 分别为线路 $i-j$ 的等效阻抗和导纳。

\mathbf{Y}' 阵中第 $n+1$ 列及第 $n+1$ 行相关元素除上述元素外均为 0; 而 \mathbf{Y}' 阵中其余元素均未改变,仍与 \mathbf{Y}_{pre} 相同。

进而可建立故障后的节点导纳矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \mathbf{I}_f \end{bmatrix}^T = \mathbf{Y}' \begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_1 & \cdots & \Delta \dot{V}_i & \cdots & \Delta \dot{V}_j & \cdots & \Delta \dot{V}_{n+1} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

式中: $\Delta \dot{V}_i$ 为节点 i 的附加正序电压相量,可由故障前后的电压相量改变量分解得到:

$$\Delta \dot{V}_i = \mathbf{M} \Delta \dot{V}_i^{\text{Phasor}} \quad (8)$$

\mathbf{M} 为正序分解矩阵; $\Delta \dot{V}_i^{\text{Phasor}}$ 为故障前后的电压相量改变量,其定义分别如下:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\alpha = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (10)$$

$$\Delta \dot{V}_i^{\text{Phasor}} = \begin{bmatrix} (\dot{V}_{ia}^{\text{pos}} - \dot{V}_{ia}^{\text{pre}}) & (\dot{V}_{ib}^{\text{pos}} - \dot{V}_{ib}^{\text{pre}}) & (\dot{V}_{ic}^{\text{pos}} - \dot{V}_{ic}^{\text{pre}}) \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

因此,由式(7)可得节点附加正序电压相量与故障点电流源 \dot{I}_f 的关系为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_1 & \cdots & \Delta \dot{V}_i & \cdots & \Delta \dot{V}_j & \cdots & \Delta \dot{V}_{n+1} \end{bmatrix}^T = \mathbf{Z}' \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \dot{I}_f \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

式中:

$$\mathbf{Z}' = (\mathbf{Y}')^{-1} \quad (13)$$

由式(12),对任意节点 i ($i=1,2,\dots,n$) 有:

$$\Delta \dot{V}_i = Z_{i(n+1)'} \dot{I}_f \quad (14)$$

而对于故障节点,则为:

$$\Delta \dot{V}_{(n+1)} = Z_{(n+1)(n+1)'} \dot{I}_f \quad (15)$$

将式(14)代入式(15),消去 \dot{I}_f ,可得故障点附加正序电压为:

$$\Delta \dot{V}_{(n+1)} = \frac{\Delta \dot{V}_i Z_{(n+1)(n+1)'}}{Z_{i(n+1)'}} \quad (16)$$

式中: $Z_{(n+1)(n+1)'}$ 为阻抗矩阵 \mathbf{Z}' 的第 $n+1$ 行、 $n+1$ 列元素, $Z_{i(n+1)'}$ 的解释同理。

由式(13)的求逆过程可知, $Z_{(n+1)(n+1)'}$, $Z_{i(n+1)'}$ 均为关于故障位置 x 的函数。

因此,式(16)表明:故障点附加正序电压相量可由网络中任意节点的附加正序电压相量和其相关的转移阻抗计算得到。

若在网络中任意 2 母线配置 PMU,则有:

$$Z_{(n+1)(n+1)'} \frac{\Delta \dot{V}_i}{Z_{i(n+1)'}} = Z_{(n+1)(n+1)'} \frac{\Delta \dot{V}_j}{Z_{j(n+1)'}} \quad (17)$$

理论上,式(17)将是关于未知参数 x 的方程,因此,可由其解得故障点位置 x ,亦即对于某个网络结构最少只需配置 2 台 PMU 就能实现对全网的故障进行定位。但对于某条线路,可能存在式(17)是恒成立的情况,即无法实现对该线路的有效定位。因此,为实现本算法对全网的完全可观,需要配置一定数量的 PMU,从而保证每条线路均存在有效的等式,即保证式(17)为有效。

假设电网中有 m ($m \geq 2$) 处母线配置有 PMU 时,则在某种故障发生后,可测得各个母线的附加正

序电压相量 ΔV_{D_i} , D_i 为网络中配置 PMU 母线对应的编号, $i \in (1, 2, \dots, m)$ 。进而有:

$$K_{D_i} = |\Delta \dot{V}_{(n+1)}| = \left| Z_{(n+1)(n+1)}' \frac{\Delta \dot{V}_{D_i}}{Z_{D_i(n+1)}} \right| \quad (18)$$

在故障点, 下述等式组成立:

$$K_{D_1} = K_{D_2} = \dots = K_{D_m} \quad (19)$$

对于网络中任意线路的故障, 若式(19)中均至少存在一个含未知数 x 的有效等式, 便可据此实现对全网的故障定位。

1.2 PMU 配置要求

在某些特殊 PMU 配置情况下, 根据式(17)无法定位其故障点。下面以图 2 为例, 分析本文定位原理对 PMU 配置的要求。

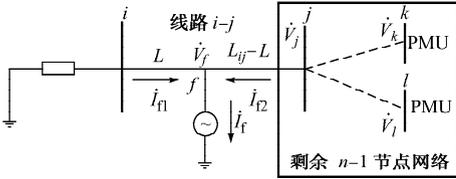


图 2 特殊 PMU 配置情况
Fig. 2 Special PMU placement set

PMU 配置方案如图 2 所示。PMU 均配置在方框图内, 故障线路 $i-j$ 在其被移除后只有一侧母线能够连通至网络中的 2 个 PMU。

若短路故障发生在线路 $i-j$ 上, 可将母线 j 看做故障点而 \dot{I}_{f2} 看做剩余 $n-1$ 节点网络的电流源。类似于式(16), 由任意母线 k 和 l 的附加正序电压相量可得到母线 j 的附加正序电压相量, 如式(20)所示。

$$\Delta \dot{V}_j = \begin{cases} \frac{Z_{jj}'}{Z_{kj}'} \Delta \dot{V}_k & \text{母线 } k \\ \frac{Z_{jj}'}{Z_{lj}'} \Delta \dot{V}_l & \text{母线 } l \end{cases} \quad (20)$$

消去式(20)中的 $\Delta \dot{V}_j$ 和 Z_{lj}' , 可得:

$$\frac{\Delta \dot{V}_k}{\Delta \dot{V}_l} = \frac{Z_{kj}'}{Z_{lj}'} \quad (21)$$

由于 Z_{kj}' 和 Z_{lj}' 为剩余 $n-1$ 节点网络的转移阻抗, 与故障位置 x 无关, $\Delta \dot{V}_k / \Delta \dot{V}_l$ 为仅与网络结构和参数有关的常数。表明此时式(17)为恒成立, 所以无法根据其定位线路 $i-j$ 上的故障点位置。

因此, 为实现在全网任意一条输电线路发生故障时均能够有效定位故障, 则需要保证任意线路两侧母线在该线路被移除后均能够连通至某个 PMU, 即网络中辐射状线路的末端必须配置 PMU。

1.3 算法实现及流程

式(17)是关于 x 的非线性函数, 直接求解非常

困难, 且需要首先判断故障所在线路。为此, 本文提出使用遍历搜索法求解该式。

基于式(19)定义匹配指标 $\overline{\Delta k}$, 如下式所示:

$$\overline{\Delta k} = \frac{\sum_{j=1}^{m-1} |K_{D_{j+1}} - K_{D_1}|}{m-1} \quad (22)$$

当且仅当在故障点时, 式(19)才能完全匹配, 即 $\overline{\Delta k} = 0$ 。以较小的步长遍历全网线路, 计算每条线路的匹配指标 $\overline{\Delta k}$, 进而可通过寻找全网最小匹配指标值定位故障点。

故障定位算法的实现流程如图 3 所示。

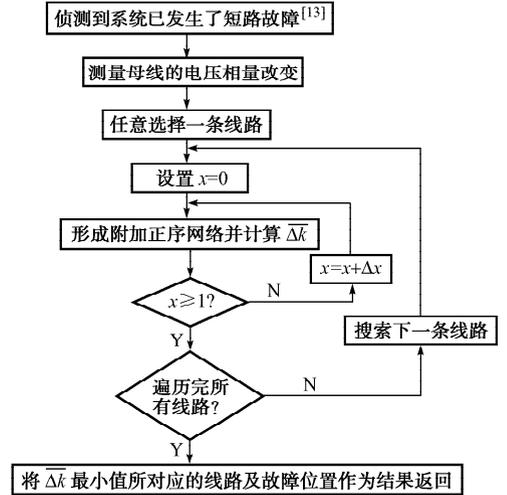


图 3 故障定位流程
Fig. 3 Flow chart of fault location

为了提高算法的计算速度, 采取以下 2 个措施:

1) 搜索的步长根据精度和计算量综合决定。本文的搜索策略是当 $\overline{\Delta k}$ 较大时采用较大的搜索步长; 当 $\overline{\Delta k}$ 较小时表明接近故障点, 改用较小的搜索步长, 从而可以在保证精度的前提下减少计算量。

2) 计算 $\overline{\Delta k}$ 时, 只对 \mathbf{Y}' 进行局部求逆(采用伴随矩阵求逆方法), 得到式(13)所需的相关 \mathbf{Z}' 矩阵元素即可, 避免不必要的运算开销。

2 仿真分析

本文基于 IEEE 9 节点及 IEEE 39 节点测试系统, 采用 PSCAD 软件对故障进行仿真模拟, 获取暂态数据并利用本文方法进行计算, 以验证定位方法的正确性和精确性。

2.1 IEEE 9 节点简单系统

按已有的定位算法^[1-6], 为保证系统所有线路故障可观, 至少需在 6 处配置 PMU。本算法仅需在发电机母线 1、母线 2、母线 3 处配置 PMU(系统参数见附录 A)。

为了说明本算法的具体实现过程,首先对单一故障进行分析。假设发生 AB 相接地故障,过渡电阻为 5Ω ,故障位于线路 2-7 且距节点 2 约 53 km 处。然后,根据本文提出的故障定位算法可获得故障位置与匹配指标 $\overline{\Delta k}$ 的关系曲线,如图 4 所示。

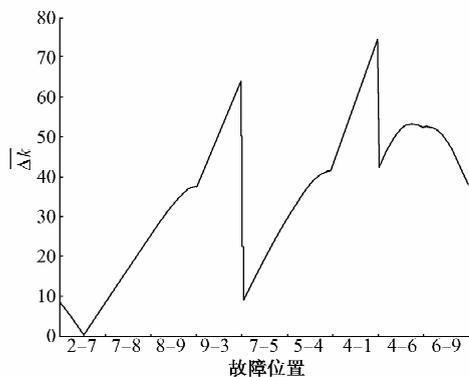


图 4 故障位置与匹配指标 $\overline{\Delta k}$ 的关系

Fig. 4 Relationship between fault location and $\overline{\Delta k}$

由图 4 可知,在线路 2-7 距母线 2 约 53.04 km 处, $\overline{\Delta k}$ 取得最小值,定位误差为 0.04 km,并且离故障点越远, $\overline{\Delta k}$ 值越大。

由上分析可知,当使用遍历搜索算法寻找到使 $\overline{\Delta k}$ 出现全局最小值且该值接近于 0 时,即可判定该位置为故障点。

为分析 PMU 配置对故障定位的影响,这里特别就仅母线 1 及母线 3 配置 PMU 进行故障定位仿真计算。如附录 B 图 B1 所示,当故障发生于线路 2-7 时,运用本文的方法无法有效地定位故障点。为此,母线 1 必须配置 PMU,同理,母线 2 和母线 3。

为了验证算法适用于不同的故障情况,以线路上发生各种短路故障为例,对于不同过渡电阻、故障类型和故障距离情况进行了大量仿真,测试结果见附录 B 表 B1。

结果表明,本算法在不同条件下均能取得较高的定位精度。本算法受过渡电阻、故障类型和故障距离的影响较小。当过渡电阻变化时,定位精度变化也很小;即使当过渡电阻较大时,算法仍能得到较高的定位精度。

2.2 IEEE 39 节点系统

为了进一步说明本方法在实际电网应用的可行性,下面以 IEEE 39 节点系统(见附录 C)为例进行验证分析。

结合本文方法对 PMU 的配置要求及目前实际电网中 PMU 投用的现状,假设该系统中仅 10 台发电机母线处装设有 PMU,且在输电线路 14-4 上距母线 14 占线路总长 30% 处发生常见的单相接地故

障。

由于该网络中线路条数较多,直接采用前文全网遍历搜索的方法可能会带来不必要的程序运行时间开销。针对此类节点数较多的电网结构,可对其可能的故障区域进行初步判断,再进行精确定位。

首先,根据本文提出的算法,假设故障发生在传输线路上所有相关母线节点的情况,同理按本文算法可获得母线位置与电压偏差匹配指标的关系图,见附录 B 图 B2。由该图可知,故障线路所在母线 4,14 处的匹配指标值取得最小值,而与其相邻的母线 3,5,6,10,13,15,16 处的值也远小于其他节点(图中偏差值大于 5 的节点均表示为 5)。该图表明离故障点越近的母线,电压偏差指标也越小,可根据此原理对可能的故障区域进行初步的选定。

然后,根据故障精确定位算法,在大致可能的故障区域(线路 4-3,5-4,14-4,6-5,13-10,14-13,15-14,16-15)遍历,可获得故障点位置与匹配指标的关系曲线,见附录 B 图 B3。由该图可知,在线路 14-4 距离母线 14 占全线总长 30.6% 处,匹配偏差值 $\overline{\Delta k}$ 取得最小值,定位误差为 0.6%。

2.3 定位精度影响因素分析

但在实际电网应用中,由于故障定位实现过程中各类已知参量的不确定性,可能会对最终的定位精度造成一定的影响。因此,有必要研究这些外部因素对本算法的影响。由附录 D 的分析可知,本算法在各种影响因素下仍具有一定的鲁棒性及实际工程应用参考价值。

3 结语

本文提出了一种基于母线电压相量的输电网络故障定位新算法。该算法有如下特点:

- 1) 仅利用电压相量进行故障定位,避免了因电流互感器饱和所导致的定位误差。
- 2) 算法简单,无需求解复杂的非线性方程,无需判断故障线路,不受过渡电阻和故障类型的影响。
- 3) 适用于任意电网结构,且仅需在电网辐射状线路末端配置 PMU 即可定位故障。目前电网公司的 PMU 配置思想倾向于首先保证电厂直接可测,而从拓扑结构上看,电厂又通常位于电网的辐射状线路末端。因此,本方法具有现实可行性。

当然,如何在现场应用中提高故障定位算法精度,尚有待进一步改进。本文算法实现的前提是电网正序参数(包括线路拓扑、参数等)已知,以便形成用于故障定位的节点导纳矩阵,因此,基于故障定位目的的电网拓扑结构和参数辨识将是下一阶段的工作。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 施世鸿,何奔腾. 不受 TA 饱和影响的高压输电线路故障测距算法. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 67-71.
SHI Shihong, HE Benteng. Fault location algorithm for HV transmission lines immune to saturation of current transformers. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 67-71.
- [2] 全玉生,王晓蓉,杨敏中,等. 工频双端故障测距算法的鲁棒性问题和新算法研究. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 28-32.
QUAN Yusheng, WANG Xiaorong, YANG Minzhong, et al. Two new algorithms and their robustness for two-terminal fault location on HV transmission line. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 28-32.
- [3] 康小宁,索南加乐. 求解频域参数方程的双端故障测距原理. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 16-20.
KANG Xiaoning, SUONAN Jiale. Frequency domain fault location method based on the transmission line parameter identification using two terminal data. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 16-20.
- [4] JIANG J A, YANG J Z, LIN Y H, et al. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I: Theory and algorithms. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 486-493.
- [5] JIANG J A, LIN Y H, YANG J Z, et al. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. II: PMU implementation and performance evaluation. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1136-1146.
- [6] LIEN K P, LIU C W, YU C S, et al. Transmission network fault location observability with minimal PMU placement. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1128-1136.
- [7] LUO S S, KEZUNOVIC M, SEVICK D R. Locating faults in the transmission network using sparse field measurements, simulation data and genetic algorithm. Electric Power Systems

- Research, 2004, 71(2): 169-177.
- [8] MINAMBRES J F, ZAMORA I, MAZON A J, et al. A new technique, based on voltages, for fault location on three-terminal transmission lines. Electric Power Systems Research, 1996, 37(2): 143-151.
- [9] GALIJASEVIC Z, ABUR A. Fault location using voltage measurements. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 441-445.
- [10] 陈铮,董新洲,罗承沐. 电流互感器饱和和影响测距精度的一种解决方法. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 39-41.
CHEN Zheng, DONG Xinzhou, LUO Chengmu. A solution to influence on fault location by saturation of current transformer. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 39-41.
- [11] ZAMORA I, MIAAMBRES J F, ALVAREZ-LSASIR, et al. Fault location on two-terminal transmission lines based on voltages. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(1): 1-6.
- [12] BRAHMA S M, GIRGIS A A. Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1619-1622.
- [13] 宋晓娜,毕天姝,吴京涛,等. 基于 WAMS 的电网扰动识别方法. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 24-28, 73.
SONG Xiaona, BI Tianshu, WU Jingtao, et al. Study on WAMS based power system disturbance identifying method. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 24-28, 73.

王波(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向:基于 WAMS 的故障测距等. E-mail: zjuwangbo@gmail.com
江全元(1975—),男,通信作者,副教授,主要研究方向:电力系统稳定与控制. E-mail: jqy@zju.edu.cn
陈晓刚(1980—),男,博士研究生,主要研究方向:基于 WAMS 的电力系统大规模灾变预防与控制. E-mail: carlxcg1980@126.com

Novel Fault Locating Method Based on Synchronized Voltage Phasor

WANG Bo¹, JIANG Quanyuan¹, CHEN Xiaogang^{1,2}, CAO Yijia¹

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Hangzhou Electric Power Bureau, Zhejiang 310009, China)

Abstract: A novel fault locating method for transmission network using synchronized voltage phasor is presented. Based on symmetrical component method and linear superposition principle, the additional positive sequence network after fault is established and the matching index on fault point is defined. Then the fault can be located by traversing searching method with this index. Because only synchronized voltage phasor is used, the fault locating accuracy of this method is not affected by saturation of current transformer, and only sparse PMUs (phasor measurements unit) are needed. Simulations carried out with PSCAD have shown that the proposed technique can locate short-fault point on any type of transmission network accurately and adaptively, with no influence from factors such as fault resistance, fault type and so on.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217902); National Natural Science Foundation of China (No. 50507018, No. 50595414, No. 60421002); National Mega-Projects of Science Research for the 11th Five-year Plan (No. 2006BAA02A01); the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (No. 305008); Program for New Century Excellent Talents (No. NCET-07-0745) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (No. R107062).

Key words: fault locating; synchronized voltage phasor; additional positive sequence network; symmetrical component method

附录 A

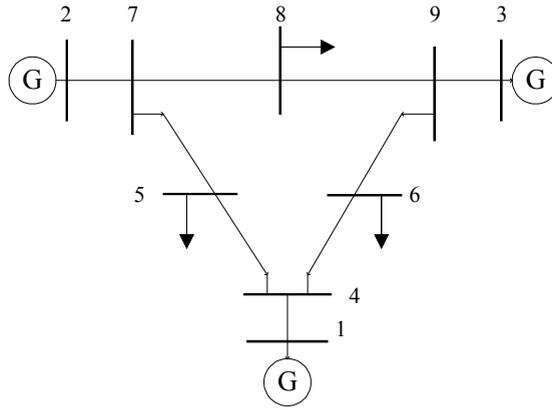


图 A1 IEEE 9 节点测试系统
Fig. A1 IEEE 9 test system

参数设置如下：

电压等级为 220 kV

线路 2-7、7-8、8-9、9-3、7-5、5-4、4-1、4-6、6-9 均设为 100 km

线路参数：

$R_1=0.0357$ (Ω/km) $X_1=0.5077$ (Ω/km) $G_1=0$ $B_1=3.271\text{e-}6$ (S/km)

$R_0=0.03631$ (Ω/km) $X_0=0.1326$ (Ω/km) $G_0=0$ $B_0=2.322\text{e-}6$ (S/km)

发电机 1: $Z_1=0.155+j5.95$ (Ω) $Z_0=1.786+j7.58$ (Ω)

发电机 2: $Z_1=0.238+j6.19$ (Ω) $Z_0=0.8330+j5.12$ (Ω)

发电机 3: $Z_1=0.420+j5.95$ (Ω) $Z_0=1.785+j7.54$ (Ω)

负载 5、6、8: 均为 30+20 (MW)

附录 B

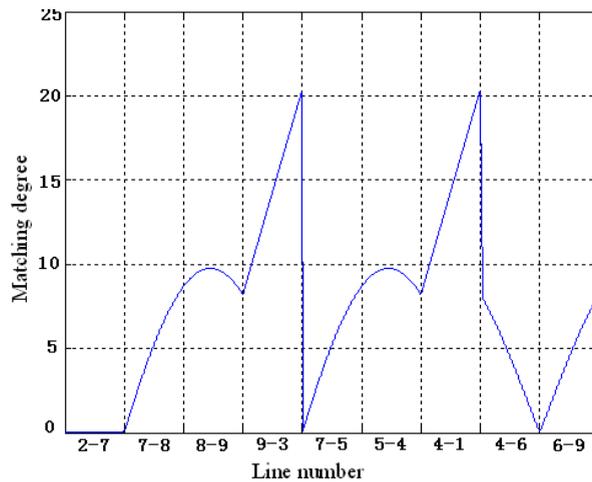


图 B1 故障位置与匹配指标 $\overline{\Delta k}$ 的关系

Fig.B1 Relationship between fault location and $\overline{\Delta k}$

表 B1 不同故障类型、过渡电阻下的仿真结果

Table B1 Simulation results under different kinds of faults and transition resistances

故障线路/(距离/km)	故障类型	过渡电阻/ Ω	定位结果/km	定位误差/(%)
线路 2-7 /35	ABG	5	35.04	0.04
线路 7-8 /43	ABCG	1	43.09	0.09
线路 8-9 /55	BCG	10	54.98	0.02
线路 9-3 /27	ABS	50	26.81	0.19
线路 7-5 /50	AG	100	50.29	0.29
线路 5-4 /63	CG	1k	63.40	0.40
线路 4-1 /70	BG	50	69.50	0.50
线路 4-6 /50	BCG	50	50.05	0.05
线路 7-9 /50	ABS	100	49.78	0.22

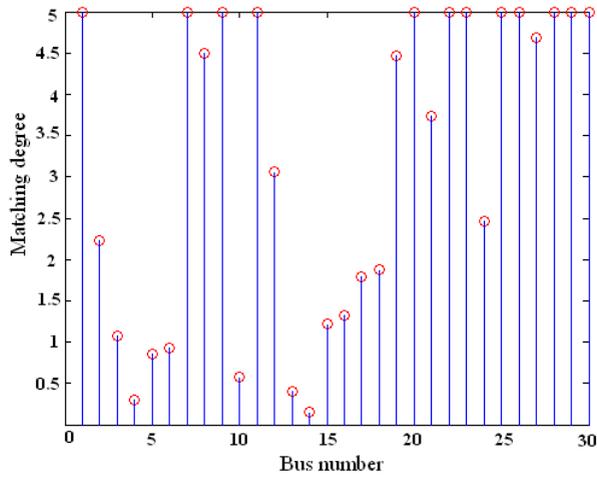


图 B2 IEEE 39 节点系统母线位置与匹配指标的 $\overline{\Delta k}$ 关系

Fig.B2 Relationship between bus and $\overline{\Delta k}$ in IEEE 39 system

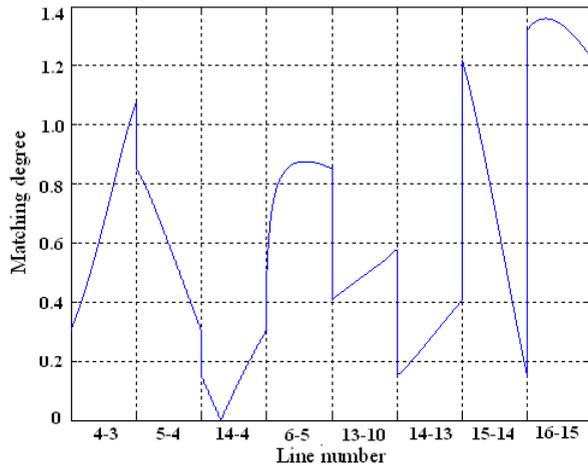


图 B3 故障位置与匹配指标 $\overline{\Delta k}$ 的关系

Fig.B3 Relationship between fault location and $\overline{\Delta k}$

附录 C

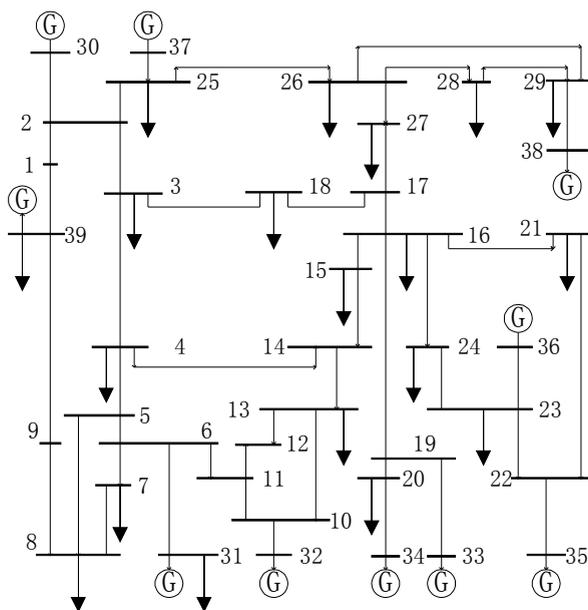


图 C1 IEEE 39 节点系统
Fig.C1 IEEE 39 system

附录 D

从参与算法的测量量来看,受限于GPS的同步精度,PMU间的采样时钟不可能达到完全同步,因此会对基于同步相量的定位算法造成很大的误差^[4-6]; 并且PMU的电压测量值也会存在着一定误差。从参与算法的假定已知条件来看,在已有的故障定位算法^[1-12]当中,线路参数都是作为已知量参与运算的,由于定位算法往往对线路参数精度有较高的要求,当线路参数不准确时,会给定位结果带来较大的误差。因此,实际线路参数与给定值不符也将是造成定位误差的一个重要原因。

下面以IEEE 9节点系统为例,假设线路7-8距离节点2约47km处发生A相接地故障(AG),过渡电阻为 50Ω 。据此,表2大致显示了上述因素对本算法定位精度带来的影响。

分析表 D-1 可知,在设定了 PMU 间的不同步误差后(WAMS 系统的最大同步误差在 $1\mu s$ 左右,本文特意将最大同步误差设置为 $10\mu s$),本算法的故障定位精度不受其影响,结合前文式(17)可知本算法偏差匹配指标仅依赖于电压相量的幅值,与电压相量是否同步无关,因此,允许同步误差的存在。但当考虑实际可能存在的电压测量和线路参数误差后,定位误差会相应增大,但仍可保持在一定的范围内。

表 D1 在不同影响因素下的定位精度

Table D1 Fault location under different kinds of influence factors

定位精度影响因素	定位结果/km	定位误差/(%)
假设测量值完全正确	46.77	0.23
母线 1 的 PMU 与母线 2、母线 3 存在 10us 的同步误差	47.77	0.23
母线 1 的 PMU 与母线 2、母线 3 分别存在 10us、-10us 的同步误差	47.77	0.23
母线 1 的 PMU 电压测量值存在 2% 的误差	45.66	1.34
母线 1、2、3 的 PMU 电压测量值分别存在 0%、2%、-2% 的误差	45.21	1.79
故障线路 7-8 的参数 Z (等效阻抗) 存在 20% 的误差	47.91	0.91
相邻线路 2-7 的参数 Z (等效阻抗) 存在 20% 的误差	46.44	0.56