两种非全相断线对偶性的研究

刘云鹏[1]，孟庆臣[2]

（1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院，甘肃 兰州 730070；2. 河南永城市供电有限责任公司，河南 永城 476600）

摘要： 单相断线和两相断线是三相电网中最常见的两种故障，占纵向不对称故障的绝大多数。因此，分析纵向不对称故障是必要的，一方面要计算非全相运行时的负序分量和零序分量，另一方面要分析非全相运行的电气特点。通过对两种断线故障的分析，应用相分量法和对称分量法，绘制出其等效的复合序网图，计算出各相的相电流和相电压。这两种故障虽然断开形式不同，但二者的物理本质、内在规律，存在明显的相似性。将通过逐项对比分析，着重阐明二者的对偶性。

关键词： 非全相；单相断线；两相断线；对偶性

Study on dual characteristic of two kinds open phase running

LIU Yun-peng[1], MENG Qing-chen[2]

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Yongcheng Power Supply Co.,Ltd,Yongcheng 476600,China)

Abstract: Single phase broken line and two-phase broken line are two faults easy too see in power system, which account more in all broken line fault. So it is necessary to analyze unbalanced faults, on one hand it needs to calculate negative sequence component and zero sequence component on open phase running, and on the other it need to analyze the characteristic of electrical open phase running. By the analysis of two kinds of open phase running, this paper uses phase-coordinate and symmetrical component to draw out the equivalent compound sequence network, and calculates the phase voltage and phase current. Although they both posses different broken lines, they have obvious similar characteristic in physical essence and inherent law. By means of comparative analysis in order, this paper puts special emphasis on clarifying their dual characteristic.

Key words: open phase; single phase broken line; two-phase broken line; dual characteristic

中图分类号： TM71 文献标识码： A 文章编号： 1674-3415(2008)23-0014-04

0 引言

电力系统的非全相运行，即单相断线和两相断线如图 1，不会引起过电压，一般也不会引起大电流（非全相运行伴随振荡情况除外）。但是，由于出现了纵向不对称，系统中要产生负序分量、零序分量。当负序分量流过发电机时，危机电机转子，造成转子过热或绝缘损坏，影响发电机出力；零序电流的出现要对附近通信系统产生干扰。另外，电力系统非全相运行产生的负序分量和零序分量，会对反应负序或零序分量的继电保护装置产生影响，要考虑是否会发生误动作。

本文将讨论纵向不对称故障的两种极端状态，即一相或两相断开的运行状态，并对二者的对偶性进行研究。造成非全相断线的原因很多，例如某一线路单相接地短路后故障相开关跳闸；导线一相或两相断线；分相检修线路或开关设备以及开关合闸过程中三相触头不同时接触等。

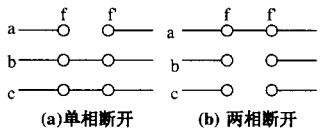


图 1 非全相断线

Fig.1 Open phase running

(a) a phase broken line (b) two phase broken line

1 单相（a相）断线的分析

（1）故障处的边界条件(见图 1(a))为

$$\dot{I}_A = 0, \quad \dot{U}_B = \dot{U}_C = 0$$

（2）求基准相的各序分量

正序、负序、零序分量分别以下标1、2、0表示，将边界条件带入序分量矩阵方程即得：

序电压：基准相A相的序电压$\dot{U}_{A1}$、$\dot{U}_{A2}$、$\dot{U}_{A0}$，简写为$\dot{U}_1$、$\dot{U}_2$、$\dot{U}_0$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{U}_2\\ U_0\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_A\\ \dot{U}_B\\ \dot{U}_C\end{bmatrix}=$$

$$\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_A\\ 0\\ 0\end{bmatrix}=$$

$$\frac{\dot{U}_A}{3}\begin{bmatrix}1\\ 1\\ 1\end{bmatrix}$$

序电流：基准相A相的序电流$\dot{I}_{A1}$ $\dot{I}_{A2}$、$\dot{I}_{A0}$、，简写为$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$、$\dot{I}_0$

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_0\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_A\\ \dot{I}_B\\ \dot{I}_C\end{bmatrix}=$$

$$\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\ \dot{I}_B\\ \dot{I}_C\end{bmatrix}=$$

$$\frac{1}{3}\begin{bmatrix}a\dot{I}_B+a^2\dot{I}_C\\ a^2\dot{I}_B+a\dot{I}_C\\ \dot{I}_B+\dot{I}_C\end{bmatrix}$$

（3）绘制复合序网图

根据所求的$\dot{U}_1=\dot{U}_2=\dot{U}_0=\frac{1}{3}\dot{U}_A$及$\dot{I}_A=0$即$\dot{I}_1+\dot{I}_2+\dot{I}_0=0$，并用基准值的序电压方程组：

$$\begin{cases}\dot{U}_1=\dot{E}_1-\mathrm{j}\dot{I}_1X_1\\ \dot{U}_2=-\mathrm{j}\dot{I}_2X_2\\ \dot{U}_0=-\mathrm{j}\dot{I}_0X_0\end{cases}$$

即可综合绘出基准相（即A相）的复合序网，如图2所示，图中$\dot{E}_1$为基准相的正序电动势，X_1、X_2、X_0分别为基准相的正序电抗、负序电抗、零序电抗。

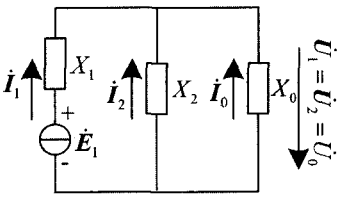


图2 单相断开的复合序网

Fig.2 The compound network of single phase broken line

（4）由复合序网求序电流及序电压

由图直接求得

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1+X_2//X_0)}=\frac{(X_2+X_0)\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0)}$$

$$\dot{I}_2=-\frac{\dot{I}_1(X_2//X_0)}{X_2}=-\frac{X_0\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0)}$$

$$\dot{I}_0=-\frac{\dot{I}_1(X_2//X_0)}{X_0}=-\frac{X_2\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0)}$$

写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0)}\begin{bmatrix}X_2+X_0\\ -X_0\\ -X_2\end{bmatrix}$$

而$\dot{U}_1=\dot{U}_2=\dot{U}_0=\dot{I}_1\mathrm{j}(X_2//X_0)=$

$$\frac{(X_2//X_0)\dot{E}_1}{X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0}$$

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{U}_2\\ \dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{(X_2//X_0)\dot{E}_1}{X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0}\begin{bmatrix}1\\ 1\\ 1\end{bmatrix}$$

（5）求不对称三相电流、电压

将上面求出的序电流、序电压数值代入电流、电压三相量的通用矩阵方程，即得

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_A\\ \dot{U}_B\\ \dot{U}_C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ a^2 & a & 1\\ a & a^2 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{U}_2\\ \dot{U}_0\end{bmatrix}=$$

$$\frac{(X_2//X_0)\dot{E}_1}{X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ a^2 & a & 1\\ a & a^2 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\ 1\\ 1\end{bmatrix}=$$

$$\frac{(X_2 // X_0)\dot{E}_1}{X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0}\begin{bmatrix}3\\0\\0\end{bmatrix}$$

三相电流为

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_A\\\dot{I}_B\\\dot{I}_C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1\\a^2&a&1\\a&a^2&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\\dot{I}_2\\\dot{I}_0\end{bmatrix}=$$

$$\frac{E_1}{\mathrm{j}(X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0)}\begin{bmatrix}1&1&1\\a^2&a&1\\a&a^2&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_2+X_0\\-X_0\\-X_2\end{bmatrix}=$$

$$\frac{E_1}{\mathrm{j}(X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0)}\begin{bmatrix}0\\(a^2-1)X_2+(a^2-a)X_0\\(a-1)X_2+(a-a^2)X_0\end{bmatrix}$$

两相（b 相和 c 相）断开的分析

（1）故障处的边界条件(见图 1（b）)为

$$\dot{I}_B=\dot{I}_C=0,\quad \dot{U}_A=0$$

（2）求基准相的各序分量

序电流

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\\dot{I}_2\\\dot{I}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{I}_A}{3}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}$$

序电压

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\\dot{U}_2\\\dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}a\dot{U}_B+a^2\dot{U}_C\\a^2\dot{U}_B+a\dot{U}_C\\\dot{U}_B+\dot{U}_C\end{bmatrix}$$

（3）绘制复合序网图

根据所求的 $\dot{I}_1=\dot{I}_2=\dot{I}_0=\frac{\dot{I}_A}{3}$ 及 $\dot{U}_A=0$ 即 $\dot{U}_1+\dot{U}_2+\dot{U}_0=0$，得图 3

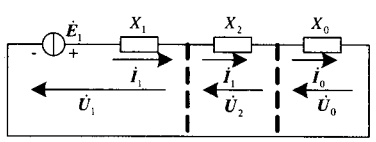


图 3 两相断开的复合网序

Fig.3 The compound network of two-phase broken line

（4）由复合序网图求序电流及序电压

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\\dot{I}_2\\\dot{I}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1+X_2+X_0)}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\\dot{U}_2\\\dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{X_1+X_2+X_0}\begin{bmatrix}X_2+X_0\\-X_2\\-X_0\end{bmatrix}$$

（5）求不对称三相电流电压

三相电流为

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_A\\\dot{I}_B\\\dot{I}_C\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{j(X_1+X_2+X_0)}\begin{bmatrix}3\\0\\0\end{bmatrix}$$

三相电压为

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_A\\\dot{U}_B\\\dot{U}_C\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{X_1+X_2+X_0}\begin{bmatrix}0\\(a^2-a)X_2+(a^2-1)X_0\\(a-a^2)X_2+(a-1)X_0\end{bmatrix}$$

3　单相断线与两相断线的对偶性

见表 1。

4　结论

由第 3 部分中的对比可见

（1）单相断线和两相断线之间的对偶性表现为“斜对称”或“交叉对称”，即前者的相电流、序电流，分别与后者的相电压、序电压形成“镜像对称”，而后者的相电流、序电流，分别与前者的相电压、序电压的表达式形成对称。

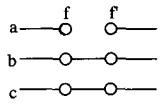
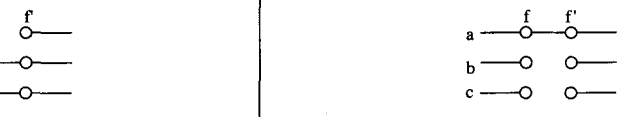
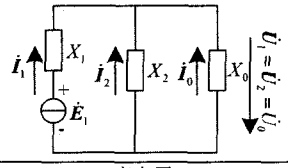
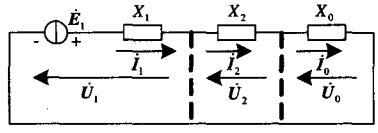
（2）在前面讨论的“复合序网”中，两种非全相断线的对偶性表现为前者“三序网并联”，后者“三序网串联”，从而前者的 $\dot{I}_0+\dot{I}_1+\dot{I}_2=0$ 对应与后者的 $\dot{U}_0+\dot{U}_1+\dot{U}_2=0$。

（3）这两种非全相断线中，无论是电压相量还是电流相量，均存在正序、负序、零序三个序分量，所以这两种故障的监测方法与继电保护，不仅可以采用通常的过压保护方案，而且还可以采用负序电流保护方案和零序电流保护方案，并且后二者在灵敏度和选择性方面均可获得比一般过压保护好得多的参数。这是因为负序电流保护及零序电流保护不仅反映被保护电气设备电气参数的变化，而且还反

映这些参数的变化。

表 1 对比

Tab.1 Comparison

序号	项目	单 相 断 线	两 相 断 线
1	故障形式图		
2	边界条件	$\begin{cases}\dot{I}_A=0,\ 即\dot{I}_1+\dot{I}_2+\dot{I}_0=0\\ \dot{U}_B=\dot{U}_C=0\end{cases}$ 基准相为 A 相	$\begin{cases}\dot{U}_A=0,\ 即\dot{U}_1+\dot{U}_2+\dot{U}_0=0\\ \dot{I}_B=\dot{I}_C=0\end{cases}$ 基准相为 A 相
3	序分量基本表达式	序电压 $\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{U}_2\\ \dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{U}_A}{3}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}$ 序电流 $\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_0\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}a\dot{I}_B+a^2\dot{I}_C\\ a^2\dot{I}_B+a\dot{I}_C\\ \dot{I}_B+\dot{I}_C\end{bmatrix}$	序电流 $\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{I}_A}{3}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}$ 序电压 $\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{U}_2\\ \dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}a\dot{U}_B+a^2\dot{U}_C\\ a^2\dot{U}_B+a\dot{U}_C\\ \dot{U}_B+\dot{U}_C\end{bmatrix}$
4	复合序网		
5	序分量的计算公式	序电压 $\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{U}_2\\ \dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{(X_2/\!/X_0)\dot{E}_1}{X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}$ 序电流 $\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0)}\begin{bmatrix}X_2+X_0\\ -X_0\\ -X_2\end{bmatrix}$	序电流 $\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1+X_2+X_0)}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}$ 序电压 $\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{U}_2\\ \dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{X_1+X_2+X_0}\begin{bmatrix}X_2+X_0\\ -X_2\\ -X_0\end{bmatrix}$
6	电流电压相量计算公式	三相电压 $\begin{bmatrix}\dot{U}_A\\ \dot{U}_B\\ \dot{U}_C\end{bmatrix}=\frac{(X_2/\!/X_0)\dot{E}_1}{X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0}\begin{bmatrix}3\\0\\0\end{bmatrix}$ 三相电流 $\begin{bmatrix}\dot{I}_A\\ \dot{I}_B\\ \dot{I}_C\end{bmatrix}=\frac{E_1}{\mathrm{j}(X_1X_2+X_1X_0+X_2X_0)}\begin{bmatrix}0\\ (a^2-1)X_2+(a^2-a)X_0\\ (a-1)X_2+(a-a^2)X_0\end{bmatrix}$	三相电流 $\begin{bmatrix}\dot{I}_A\\ \dot{I}_B\\ \dot{I}_C\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{\mathrm{j}(X_1+X_2+X_0)}\begin{bmatrix}3\\0\\0\end{bmatrix}$ 三相电压 $\begin{bmatrix}\dot{U}_A\\ \dot{U}_B\\ \dot{U}_C\end{bmatrix}=\frac{\dot{E}_1}{X_1+X_2+X_0}\begin{bmatrix}0\\ (a^2-a)X_2+(a^2-1)X_0\\ (a-a^2)X_2+(a-1)X_0\end{bmatrix}$

参考文献

[1] 于永源，杨绮雯. 电力系统分析（第二版）[M]. 北京：中国电力出版社，2004.

（下转第 64 页　continued on page 64）

Technology in Monitoring System of Sistribution Transformer[J].Relay, 2004,32(24):37-40.
[5] Britton J P. Devos N.CIM-Based Standards and CIM Evolution[J].IEEE Trans on Power Systems,2005,20(2): 758-764.
[6] 郭上华,刘保玉. GPRS 网络在配电自动化中的应用[J]. 继电器, 2005, 23(8) :56-60.
GUO Shang-hua，LIU Bao-yu.Application of GPRS Network to Power Distribution Automation System[J]. Relay, 2005,23(8): 56-60.
[7] 许卫兵. 基于 SOA 的电力系统信息集成平台的研究与实现[J]. 自动化仪器与仪表, 2008, (1) :34-37.
XU Wei-bing.
[8] 刘英丹，董传良. 利用 Web Service 实现企业应用集成[J]. 计算机应用, 2003, 23(7) :124-126.
LIU Ying-dan,DONG Chuan-liang.Implement EAI with Web Service[J].Computer Applications, 2003,23(7): 124-126.
[9] 苗青,陈钢. 基于 WebService 的高校应用集成[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(3) :17-20.
MIAO Qing, CHEN Gang. Application Integration Based on WebService in Universities[J]. Computer Technology and Development, 2008,18(3):17-20.
[10] 占梁梁，张勇传基于 SOA 的水轮发电机组电子诊断系统设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13) :96-100.
ZHAN Liang-liang，ZHANG Yong-chuan. Design of a SOA-oriented E-diagnosis System for Hydroelectric Generating Sets[J].Automation of Electric Power System, 2007,31(13):96-100.
[11] 毛新生. SOA 原理、方法、实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2007.
Beijing: Publishing House of Electronics Industry
[12] 张慎明，刘国定. IEC 61970 标准系列简介[J]. 电力系统自动化, 2002，26(24)：1-6.
ZHANG Shen-ming，LIU Guo-ding.Introduction of Standard IEC 61970[J].Automation of Electirc Power Systems, 2002，26(24)：1-6.
[13] 简 斌，左荣国,等. 基于 SOA 的中小制造企业应用集成系统研究[M]. 计算机工程, 2007, 33(5) :243-245.
JIAN Bin, ZUO Rong-guo. SOA-based Application Integration System of Small and Medium-sized Manufacture Enterprises[M].Computer Engineering, 2007,33(5):243-245.
[14] 索红光,左利云. 基于 UDDI 的服务代理的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(18) :4526-4528.
SUO Hong-guang, ZUO Li-yun. Design and Implementation on Service Broker Based on UDDI[J]. Computer Engineering and Design,2007,28(18):4526-4528.
[15] 马晓轩,怀进鹏. 基于 UDDI 的应用服务注册中心的设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报 2005, 31(9) : 1040-1044.
MA Xiao-xuan,HUAI Jin-peng. Design and Implementation on UDDI-based Application Service Center[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,31(9):1040-1044.

收稿日期：2008-05-14；　修回日期：2008-07-13
作者简介：
周芝庭（1968-），女，讲师，博士研究生，主要研究方向为机械制造及其自动化;
蒋宏图（1972-），男，工程师，主要从事电力系统及其自动化的研究与开发;
熊　晔(1981-)，男，学士，助理工程师，主要进行电力系统自动化的研发。

（上接第 17 页　continued from page 17）
[2] 何首贤，葛廷友，姜秀玲. 供配电技术[M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.
[3] 何仰赞，温增银. 电力系统分析（第三版）[M]. 武汉：华中科技出版社，2002.
[4] 贺家李. 电力系统继电保护原理（第三版）[M]. 北京：中国电力出版社，2000.
[5] 潘绵英，臧潘颖. 论两种不对称短路的对偶性[J]. 济南：山东建材学院学报，1994
[6] 王宝华. 电力系统故障分析[M]. 北京：中国电力出版社，2006.

收稿日期：2008-03-21；　修回日期：2008-05-03
作者简介：
刘云鹏（1981-），男，硕士研究生，研究方向为电力电子与电力传动；E-mail: yun5136@163.com
孟庆臣(1965-)，男，本科，工程师，从事变电运行、检修研究管理工作。

（上接第 35 页　continued from page 35）
[11] 刘同明.数据挖掘技术及其应用[M].北京:国防工业出版社,2001.
LIU Tong-ming. Data Mining Technology with Applications[M]. Beijing:National Defence Industry Press,2001.

收稿日期：2008-04-07；　修回日期：2008-06-19
作者简介：
袁文杰（1971-），女，讲师，硕士生，研究方向为计算机应用技术、电网故障诊断；E-mail: helen_99_00@163.com
曲朝阳（1964-），男，教授，硕士生导师，研究方向为计算机网络、电力系统应用;
李月玲（1965-），女，副教授，研究方向为电力分析、电力系统自动化。