

任意故障设置下的故障补偿电流计算

何 桦, 顾 全, 柴京慧

(南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211100)

摘要: 在综合阻抗矩阵的故障补偿算法的基础上, 分析了线路非端点位置故障以及同一条线路多重故障等复杂情况下的补偿电流计算。基于线性网络的基本理论, 该算法通过补偿电流的分解以及综合阻抗矩阵的扩展等网络变换方法, 能够在复杂故障情况下保持网络的拓扑节点数不变, 从而保留故障补偿算法的优点。同时, 该算法对任意故障设置下的故障补偿电流计算都具有规范统一的形式, 便于计算机编程实现, 进一步提高故障计算的速度。

关键词: 故障计算; 复故障; 补偿算法; 网络变换

中图分类号: TM744

0 引言

故障计算是电力系统分析计算中的重要内容, 既可以作为一个单独的模块在系统的规划、设计及运行中进行分析计算, 也可以作为其他模块的一个子模块参与计算。例如, 在调度员培训仿真中为基于定值判断的继电保护仿真提供故障后的电压电流, 在系统稳定计算中提供故障后各节点电压的矢量等。这些应用对故障的计算时间都提出了较高的要求, 同时考虑到现代电力系统的复杂性, 往往还希望可以在系统中任意设置故障以供研究^[1]。

文献[2]中提出了基于综合阻抗矩阵的复故障补偿电流算法, 该故障计算方法一般情况下可以利用原有的导纳矩阵进行故障计算, 无需修改导纳矩阵, 能满足系统稳定计算的要求。但是故障往往不是发生在网络的原有节点上, 在更为细致的故障分析计算过程中, 故障的设置应该是任意的, 还需要考虑在线路的非端点位置处发生故障, 以及在同一线路设置多重故障等的复杂情况。在此情况下, 为了保持故障电流补偿算法不改变网络拓扑结构的优点, 还需要将补偿电流进一步分解。

本文将复故障的补偿电流算法为基础, 主要介绍一种在线路任意位置故障以及同一条线路上发生多重故障时规范的补偿电流求解方法, 使用该方法可以在任意故障设置下都保持网络的导纳矩阵不变, 从而提高故障计算的速度, 并简化程序的编写。

1 复故障的补偿算法^[2]

故障分析的综合阻抗矩阵法^[3]对各种故障类型都具有统一处理形式, 是一种通用的故障分析方法。

使用该方法通常需要修改原有的正序导纳矩阵, 即在模拟故障时需要叠加一个故障修正网络而转化为增广正序网络。这样, 整个故障计算就需要分别针对正序增广网络、正序网络(可近似为负序网络)和零序网络做 3 次分解因子表。

如果保持所有故障端口的故障外接支路的注入电流不变, 进而将所有故障端口的故障外接支路的作用等效为对网络节点注入电流的故障补偿修正, 则故障后的网络方程求解可不修改原有的正序导纳矩阵, 而是直接使用故障口外支路的补偿电流进行计算。使用这种等效的补偿电流后, 整个故障计算中就可以省去正序增广网络进行因子表的分解, 仅仅需要对正序网络和零序网络这两个网络各做一次分解因子表, 可缩短故障计算时间, 且简化程序的编写。因此, 这种故障计算方法的核心在于补偿电流的求解。在求得补偿电流后可以很容易地求出各序网的电压值, 进而完成整个故障计算。

如图 1 所示, 故障点 f 的左侧为原网络经多口戴维南定理简化后的等效电路, 包括故障前故障口的电压矢量 U_{F0} 和故障口综合阻抗矩阵 Z_T 。 f 点右侧为反映故障修正网络的综合阻抗矩阵 Z_F 。

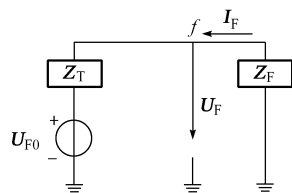


图 1 故障计算的补偿算法

Fig. 1 Compensation method for fault calculation

由图 1 可以求出故障补偿电流为:

$$I_F = -[Z_T + Z_F]^{-1} U_{F0} \quad (1)$$

2 任意故障设置下的补偿电流求解

当故障发生在线路中间时,一般的处理方法是增加故障发生点为网络新的节点,并将故障补偿电流放在新增的节点上进行计算,这样又需要重新进行节点的优化编号,并修改原有的导纳矩阵重新分解因子表,从而丧失补偿电流法不修改网络原有导纳矩阵的优点。尤其是当同一条线路上发生多重故障时,这种修改将大大增加程序的复杂性。因此,使用故障补偿电流分析这种情况时,最好能保持网络的节点数不变。由式(1)可知,这需要进行两方面的工作:一方面,将原正序网络故障支路上的补偿注入电流分解到故障线路的两端节点上,以便能利用原网络计算出故障口综合阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_T$;另一方面,修改原故障口的综合阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_F$,以适应故障补偿电流的分解。以下分析不讨论有过渡阻抗的情况。

2.1 非端点位置短路时补偿电流的分解

故障经常发生在非端点位置处,为了避免因修改导纳矩阵而增加程序的耗时和复杂性,此时故障处的等效补偿电流最好能够分解到故障线路的两个原有节点上,从而保持网络的节点数不变。

等效补偿电流分解的原则是:在分解后的补偿注入电流的作用下,网络的节点电压能够保持不变。根据网络互易原理,故障点 f 注入单位电流且无其他节点注入电流时,网络中某一节点 r 的电压值,与由 r 节点注入单位电流且无其他节点注入电流时故障点 f 的电压值相同。根据节点阻抗矩阵元素的物理意义,该电压值就是新增故障点 f 和网络原有节点 r 的互阻抗值 Z_{fr} ^[1]:

$$Z_{fr} = (1-k)Z_{ir} + kZ_{jr} \quad (2)$$

式中: i, j 为故障线路的两个端点; k 为故障点 f 和故障线路 i 端点之间的距离占线路全长的百分比; Z_{ir}, Z_{jr} 分别为网络中节点 i 和节点 r 以及节点 j 和节点 r 的互阻抗。

利用式(2)可以得出如下结论:非端点位置故障处的单位补偿注入电流可以分解为故障线路两个端点位置的等效注入电流。

以图2为例,在一条线路的 f 处发生故障,则在该故障点的故障补偿电流 I_f 可以分解为在故障线路的两端 i, j 分别注入 $(1-k)I_f$ 和 kI_f 的故障补偿电流。

这种将非端点位置的补偿电流分解到端点位置的方法,避免了在故障处增加节点,保持了原有网络节点数的不变。并且根据网络的叠加原理,当同一条线路上发生多重故障时,每个故障补偿电流都可以如图2所示分解到网络原有节点上,然后进行补

偿电流的叠加,从而大大降低同一线路上有多重故障情况下程序的复杂性。

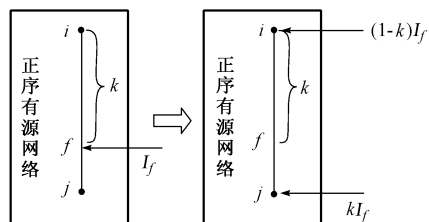


图2 补偿电流的分解

Fig. 2 Fault compensatory current decomposition

在将故障补偿电流分解到网络的原有节点上后,根据故障口综合阻抗矩阵的定义,于是可以很容易地求出式(1)中的 $\mathbf{Z}_T$ 。

2.2 综合阻抗矩阵的扩展

综合阻抗矩阵对应的网络其实是反映故障变化部分的一个故障修改网络。该故障修改网络一般在故障发生地点和原正序网络进行连接,原正序网络就成为正序增广网络。当线路的非端点位置发生故障时,综合阻抗矩阵(即故障修改网络)将不能和正序网络的原有节点进行连接。与前面故障补偿电流的分解相对应,综合阻抗矩阵也需要从故障发生地点扩展到故障线路的两个端点,这样就可以和正序网络的原有节点进行连接,从而最终实现任意故障设置下对故障补偿电流的求解。

当线路的非端点位置发生故障时,将正序增广网络从故障线路的两个端点位置处分离出一个新的故障修改网络,这个新的故障修改网络包含了故障线路和原来故障修改网络两部分。观察这个新的故障网络可以发现,该网络中有两类节点:一类节点是故障线路的原有端点,对这个新的故障网络而言这类节点是有节点注入电流的;另一类节点是非端点位置故障处的故障节点,这类节点是没有节点注入电流的。对新的故障修改网络中没有注入电流的节点进行消去,仅仅保留故障线路的两个原有端点,就可以得到新的扩展了的综合阻抗矩阵。为了保持原网络的导纳阵不变,可在故障线路的两个端点位置处分别接入故障线路和阻抗值为故障线路阻抗的相反数的虚拟故障线路,将虚拟故障线路并入新的故障修改网络,从而得到最终的故障修正网络,即可得到最终的修正网络综合阻抗矩阵。

以图3为例,在支路 ij (阻抗为 Z_{ij}) 的两处 f_1 和 f_2 发生故障,于是这两点就连接着故障修正网络(即综合阻抗矩阵所表示的网络),为了能够使用原网络节点,而不增加两个节点,进行故障电流的补偿,将故障支路 ij 合并到故障修正网络中,消去故

障节点 f_1 和 f_2 , 得到包含故障线路的故障修正网络, 然后在端点 ij 处增加阻抗值分别为 Z_{ij} 和 $-Z_{ij}$ 的两条线路, 将阻抗值为 $-Z_{ij}$ 的线路并入故障修正网络, 从而在保持原网络不变的情况下将故障修正网络扩展到故障线路的两个原有节点上, 实现非端点位置故障情况下扩展的故障修正网络和正序网络的原有节点的连接。

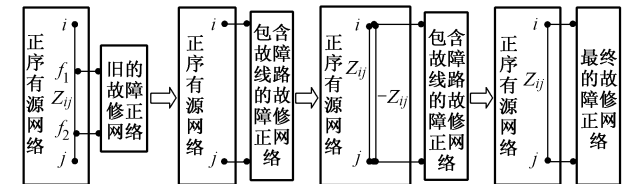


图3 扩展的故障修正网络

Fig. 3 Expanding fault modification network

以子集 B 表示有注入电流的节点集合, 子集 I 表示无注入电流的节点集合, 于是对包含了故障线路和原来故障修改网络的新的故障修改网络列出节点导纳矩阵:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{BB} & \mathbf{Y}_{BI} \\ \mathbf{Y}_{IB} & \mathbf{Y}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_B \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

消去无注入电流的节点, 亦即消去式(3)中 $\mathbf{U}_I$, 则可以得到:

$$\mathbf{Y}_F \mathbf{U}_B = \mathbf{I}_B \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}_F = \mathbf{Y}_{BB} - \mathbf{Y}_{BI} \mathbf{Y}_{II}^{-1} \mathbf{Y}_{IB} \quad (5)$$

式(5)中的 $\mathbf{Y}_F$ 就是包含故障线路的综合导纳矩阵, 该导纳矩阵再包含进阻抗值为 $-Z_{ij}$ 的线路, 最后所得矩阵的逆阵就是式(1)中在复杂故障设置下的综合阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_F$ 。

3 验证算例

假设有如图4所示的两节点网络, 电流源的内阻抗无穷大, 电流大小为1 A, 3条线路的正序阻抗分别为 $1\ \Omega$, $7\ \Omega$, $1\ \Omega$, 所有负序和零序阻抗都与各自正序阻抗相同。在阻抗值为 $7\ \Omega$ 的线路上(分别距离节点①为 $2\ \Omega$ 处和 $5\ \Omega$ 处)发生A相金属性接地和BC两相金属性短路接地。

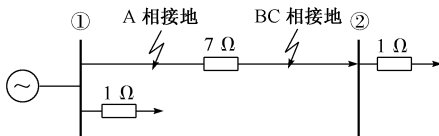


图4 单机两节点系统

Fig. 4 One-machine 2-bus system

依照前面的分析, 先求出从两个故障端口(即故障新增节点③和④, 如图5所示)看去的故障修正网

络综合阻抗矩阵为 $\begin{bmatrix} 4 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \Omega$ 。该综合阻抗矩阵的推导可以参见参考文献3。

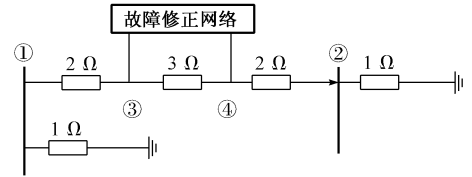


图5 正序增广网络

Fig. 5 Positive-sequence augment network

根据图5, 可求出有注入电流节点集合(即节点①和②)的导纳阵 $\mathbf{Y}_{BB} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \text{S}$, 无注入电流节点集合(即故障新增节点③和④)的导纳阵 $\mathbf{Y}_{II} = \begin{bmatrix} 1.17 & 0 \\ 0 & 2.17 \end{bmatrix} \text{S}$, 联系矩阵 $\mathbf{Y}_{IB} = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 \\ 0 & -0.5 \end{bmatrix} \text{S}$ 。从式(5)可以求出包含故障线路的综合导纳矩阵 $\mathbf{Y}_F = \begin{bmatrix} 0.285 & 0 \\ 0 & 0.385 \end{bmatrix} \text{S}$, 进而可求出包含故障线路阻抗相反数($-7\ \Omega$)的矩阵的逆阵 $\mathbf{Z}_F = \begin{bmatrix} 17.1 & -10.1 \\ -10.1 & 10.1 \end{bmatrix} \Omega$ (即从网络原有节点①和②看去的故障修正网络综合阻抗矩阵)。故障口综合阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_T$ 可以方便地求出, $\mathbf{Z}_T = \begin{bmatrix} 0.89 & 0.11 \\ 0.11 & 0.89 \end{bmatrix} \Omega$, 故障前故障口的电压矢量 $\mathbf{U}_{F0} = \begin{bmatrix} 0.89 \\ 0.11 \end{bmatrix} \text{V}$ 。由式(1)可以求出故障补偿电流 $\mathbf{I}_F = \begin{bmatrix} -0.11 \\ -0.11 \end{bmatrix} \text{A}$ 。由此可以方便地求出三序电压和三相电压, 其中节点①的A相电压为 $0.667\ \text{V}$, B相电压为 $0.833\ \text{V}$, C相电压为 $0.833\ \text{V}$, 而节点②的三相电压都为0, 这可以从故障发生的情况很容易地得到验证。

4 结语

基于综合阻抗矩阵的故障补偿算法, 具有保持原网络的拓扑结构不变、计算速度快的优点。以该算法为基础, 本文通过将补偿电流分解到网络的原有节点上以及扩展综合阻抗矩阵的网络变换方法, 将补偿算法应用到考虑在线路非端点位置发生故障以及同一线路上多重故障等复杂情况下故障补偿电流的计算。由于没有增加故障节点作为新增节点, 该算法只是基于原有网络节点及网络方程进行计算, 所以能够提高故障计算速度, 同时对任意故障设置下的故障补偿电流计算具有规范统一的形式, 易于编程实现。

4) 引入用户定制功能, 当用户在某段时间要密切关注某些参数(例如经常出现异常的参数、重点关注的参数等)时, 可将这些参数设定为“我关心的监督项目”, 便于重点监督, 这样既可突出重点, 又可根据具体情况灵活设定, 给用户提供了极大的便利。

5) 系统不仅在沙角 C 电厂局域网内可以应用, 只要有相应的权限, 任何可接入 Internet 的端口都可以访问该系统, 并可进行远程交互操作。

4 结语

沙角 C 电厂技术监督管理系统投运后, 减轻了技术负责人的工作负担, 提高了工作效率, 增强了设备事故的预警功能和判别决策能力, 使技术监督管理工作更加系统化和规范化。

参考文献

- [1] 国家电力公司发输电运营部. 电力工业技术监督规定汇编. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Power Generating and Transmitting Department, State Power Corporation. The Technical Supervision of Power Industry Stipulates and Collects. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 苏羽, 王媛媛. Visual C++ 网络游戏建模与实现. 北京: 北京科海电子出版社, 2003.
SU Yu, WANG Yuan-yuan. Game Modeling of the Network

and Realizing with Visual C++. Beijing: Electronic Publishing House of Subject Sea of Beijing, 2003.

- [3] BENAGE D, MIRZA A. 应用 Visual Studio 6.0 构建企业解决方案. 潇湘工作室, 译. 北京: 人民邮电出版社, 1999.
BENAGE D, MIRZA A. Building Enterprise Solutions with Visual Studio™6. SAMS Programming. Xiaoxiang Workroom, Trans. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1999.
- [4] 史忠植. 知识发现. 北京: 清华大学出版社, 2001.
SHI Zhong-zhi. Knowledge Discovery. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [5] Powers S. Developing ASP Components, 2nd ed. Sebastopol (CA, USA): O'Reilly & Associates Inc, 2001.
- [6] 李代平, 张文. SQL Server 2000 数据库应用基础教程. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
LI Dai-ping, ZHANG Wen. SQL Server 2000 Database Application Foundation Study Course. Beijing: Publishing House of Metallurgical Industry, 2001.
- [7] INMON W H. Building the Data Warehouse, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996.

张 胜(1969—), 男, 博士, 研究方向为 GPS/GIS 技术应用、人工智能、决策支持. E-mail: zwxzs_168@163.net

黄建华(1969—), 男, 博士, 研究方向为 GPS/GIS 技术应用、数据库技术. E-mail: hjh111128@sohu.com

钟世明(1973—), 男, 博士, 研究方向为 GPS/GIS 技术应用、WEBGIS. E-mail: mzhong93@hotmail.com

(上接第 86 页 continued from page 86)

参考文献

- [1] 刘万顺. 电力系统故障分析. 北京: 中国电力出版社, 1998.
LIU Wan-shun. Power System Fault Analysis. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] 汤涌. 电力系统稳定计算复故障补偿算法. 中国电机工程学报, 1999, 19(21): 77—79.
TANG Yong. A Compensation Method for Simulation Faults Solution in Power System Stability Simulation. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(21): 77—79.
- [3] 西安交通大学. 电力系统计算. 北京: 水利电力出版社, 1978.

Xi'an Jiaotong University. Computation of Power Systems. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.

何 桦(1977—), 男, 硕士, 主要从事电力系统分析软件的开发与研制. E-mail: hehua@rcs-9000.com

顾 全(1970—), 男, 工程师, 主要从事调度自动化系统的研究与开发工作。

柴京慧(1977—), 女, 硕士, 主要从事电力系统调度及监控自动化研制与开发工作。

Calculation of Fault Compensating Current in the Condition of Arbitrary Fault Settings

HE Hua, GU Quan, CHAI Jing-hui

(NARI-Relays Electrical Company Ltd, Nanjing 211000, China)

Abstract: On the basis of the compensating method for fault calculation based on the composite impedance matrix, further study is made on the complicated fault conditions of the fault positions not in the original nodes of the power system and the multi-faults in the same transmission line. According to the basic theory of the linear circuit, by applying the network transformation method for the fault compensating current decomposition and the composite impedance matrix expansion, the fault calculating method is capable of keeping the topological node number unchanged under any complicated faults conditions, thus retaining the convenience of the compensating method. The method proposed has a canonical form in the condition of arbitrary fault settings, which is suitable for computer analysis and further improving the calculating speed.

Key words: fault calculation; multi-faults; compensating method; network transformation