

基于补偿法的快速短路电流算法

但扬清¹, 刘文颖¹, 朱艳伟¹, 李 扬¹, 程 林²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206; 2. 西北电网有限公司, 陕西省西安市 710048)

摘要: 提出一种基于戴维南定理和补偿法的快速短路电流计算方法, 算法中采用补偿法在故障端口引入补偿电流, 以此来模拟节点短路故障对原网络的影响。该方法无需修改节点导纳矩阵, 仍采用故障前的导纳矩阵来解算网络的状态, 可达到求解整个网络的目的。与通用算法相比, 既能计算各种类型的短路故障, 又节省了求解故障后导纳矩阵的时间。计算结果表明, 该算法计算速度快、精度高, 能更好地满足短路电流的实时计算需要。

关键词: 导纳模型; 戴维南定理; 补偿法; 短路故障; 故障计算

0 引言

随着电能需求量的不断增加, 电力系统装机容量急剧上升, 大机组比率增大, 且大机组一般升压后直接接入高压电网, 加上电网中大量使用自耦变压器, 从而造成电网短路电流水平过高, 部分区域的短路电流已接近或超过开关的遮断容量。因此, 有必要进行电网短路电流的实时计算和监测以便实时校验断路器遮断容量^[1-3], 保证电网的安全运行。

电力系统短路故障是一个复杂的电磁暂态过程, 通用的短路电流计算方法^[4]是应用对称分量法分析计算三相对称电力系统的不对称短路。首先将故障端口处三相不对称的支路阻抗参数等值转换成 3 个互相独立的正、负、零序三相对称的电流源, 从而将难以求解的三相不对称故障的计算, 转换成易于求解的 3 个互相独立又对称的三相电路网络的计算。上述计算短路电流方法具有通用性, 但每次发生故障时, 序网络需重构, 各序网络节点导纳矩阵需修改, 在解算各序大型电路网络时, 计算工作量非常大, 显著降低了计算速度, 而且占用了大量内存。

文献[5-10]从网络分析的角度着手, 有效解决了变化网络的故障和复杂故障的计算等问题, 但仍没有解决快速求解网络的问题。文献[11-12]中的算法简单快捷, 但都是将电网进行一定简化后再进行计算分析, 降低了计算精度。因此, 上述算法均不能满足短路电流实时计算和监测的要求。

文献[13]将补偿法^[14]应用于分支系数计算中, 为继电保护速动性作出了一定的贡献。可见, 在网络结构发生改变的情况下, 使用补偿法计算改变后的网络较一般算法速度快。本文采用电流补偿替代

由于拓扑结构改变而进行的导纳矩阵的修改和计算, 既提高了求解故障后网络的速度, 又保证了计算精度, 能够满足短路电流的实时计算和监测需求。

1 故障模型

短路电流故障模型采用如图 1 所示的导纳模型。

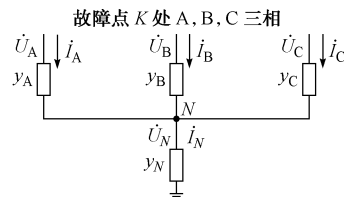


图 1 导纳模型
Fig. 1 Admittance model

当导纳 y_A, y_B, y_C 和 y_N 取不同值时, 该模型能模拟不同的故障, 具有通用性。例如: 4 个参数均为无穷大时, 可以模拟三相对地对称短路; y_A 和 y_B 为 0 且 y_C 和 y_N 为无穷大时, 可以模拟 C 相金属性接地故障; 电网正常运行情况下可以认为所有导纳值均为 0, 具有通用性。模型的节点电压方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \\ \dot{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_A & 0 & 0 & -y_A \\ 0 & y_B & 0 & -y_B \\ 0 & 0 & y_C & -y_C \\ -y_A & -y_B & -y_C & Y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \\ \dot{U}_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{简记: } \mathbf{Y}_{ABC} = \begin{bmatrix} y_A & 0 & 0 \\ 0 & y_B & 0 \\ 0 & 0 & y_C \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_1 = [-y_A \quad -y_B \quad -y_C]^T, \mathbf{I}_{ABC} = [\dot{I}_A \quad \dot{I}_B \quad \dot{I}_C]^T, \dot{\mathbf{U}}_{ABC} = [\dot{U}_A \quad \dot{U}_B \quad \dot{U}_C]^T, \mathbf{Y}_2 = \mathbf{Y}_1^T, Y_N = y_N + y_A +$$

$y_B + y_C$ 。

从式(1)中消去不可达节点 N ,得

$(Y_{ABC} - Y_1 Y_N^{-1} Y_2) \dot{U}_{ABC} = \dot{I}_{ABC} - Y_1 Y_N^{-1} \dot{I}_N$ (2)

记 $Y_f = Y_{ABC} - Y_1 Y_N^{-1} Y_2$, 由于 N 点没有注入源即 $\dot{I}_N = 0$, 因此式(2)简化为:

$Y_f \dot{U}_{ABC} = \dot{I}_{ABC}$ (3)

即节点 i 发生短路故障时, 等效于故障点增加接地导纳阵 Y_f 。

2 补偿法

2.1 原理概述

电力系统发生故障后, 网络拓扑结构将会发生改变。应用补偿法求解故障后的网络, 不需要修改节点导纳矩阵。其原理是在故障端口引入某个待求的电流增量或称之为“补偿电流”, 以此来模拟节点故障对原网络的影响。这样, 就可以避免通用法需要的网络重构和矩阵求逆运算, 提高了运算速度; 另一方面本方法采用的故障模型与通用法故障模型完全一样, 因而能够保证计算精度。

2.2 引入补偿电流

如图 2 所示, 将电网中所有节点和电源抽取出来, 整个网络形成无源网络和电源 2 个部分。图中所标物理量均为三维列向量, 表示三相线路(图 3 和图 4 亦同)。

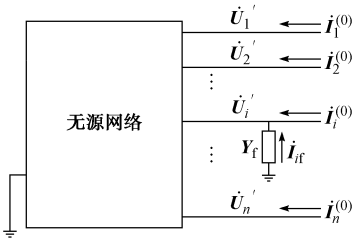


图 2 短路故障
Fig. 2 A short-circuit fault

当网络节点 i 发生短路, 可以等效认为该节点三相经 Y_f 接地, 这时注入原网络的注入电流向量将由 $\dot{I}^{(0)}$ 变为 $\dot{I}'$, 即故障节点新增一个注入电流 $\dot{I}_{if}$, $\dot{I}_{if}$ 即为补偿电流, 用该量补偿故障响应。由于线性网络满足叠加原理, 故可以根据注入电流将故障网络分解成个 2 个网络的叠加, 如图 3 所示。

$\dot{I}^{(0)} = [\dot{I}_1^{(0)} \quad \dot{I}_2^{(0)} \quad \dots \quad \dot{I}_i^{(0)} \quad \dots \quad \dot{I}_n^{(0)}]^T$ (4)

$\dot{I}' = [\dot{I}_1^{(0)} \quad \dot{I}_2^{(0)} \quad \dots \quad \dot{I}_i^{(0)} + \dot{I}_{if} \quad \dots \quad \dot{I}_n^{(0)}]^T = \dot{I}^{(0)} + \dot{I}_f$ (5)

$\dot{I}_f = [0 \quad 0 \quad \dots \quad \dot{I}_{if} \quad \dots \quad 0]^T = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0]^T \dot{I}_{if} = M_i \dot{I}_{if}$ (6)

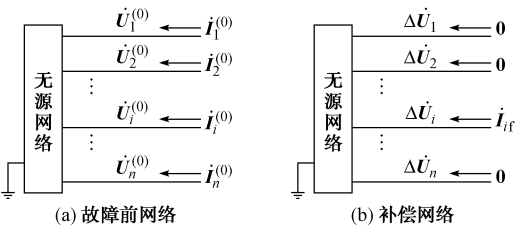


图 3 补偿法模拟故障
Fig. 3 Fault simulation by compensation method

2.3 故障点短路电流的计算

假设故障前电网是三相对称的, 应用等效发电机原理, 把图 2 所示电路上的节点 i 与地之间的故障端口进行戴维南等效, 等效电源电压即为端口的开路电压, 即节点 i 发生故障前的相电压向量 $\dot{U}_i^{(0)}$ 。

在故障端口注入单位电流向量, 其他节点注入电流为零向量, 所得端口电压 $\dot{U}_i^{(1)}$ 在数值上等于故障端口等效阻抗矩阵 Z_{eq} , 即

$Z_{eq} = |\dot{U}_i^{(1)}| = M_i^T Z M_i = Z_{ii}$ (7)

式中: Z 为系统阻抗矩阵。

由于假设故障前电网是三相对称的, Z_{eq} 和 Z_{ii} 均为 3×3 对角阵, 得到三相独立的戴维南等效电路, 如图 4 所示。将节点前移至电源出口, 得到图 5 所示电路。

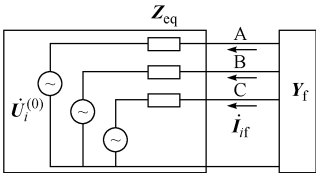


图 4 等效电路
Fig. 4 Equivalent circuit

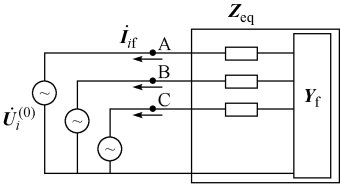


图 5 变换后电路
Fig. 5 Post-transformation circuit

图 5 中三相节点电压已知, 左边方框中无源网络的节点导纳矩阵可以根据不同故障直接写出。故障电流向量表达式为:

$$\begin{bmatrix} -\dot{I}_{ifA} \\ -\dot{I}_{ifB} \\ -\dot{I}_{ifC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{AA} & y_{AB} & y_{AC} \\ y_{BA} & y_{BB} & y_{BC} \\ y_{CA} & y_{CB} & y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{iA}^{(0)} \\ \dot{U}_{iB}^{(0)} \\ \dot{U}_{iC}^{(0)} \end{bmatrix} = Y_{ABC} \begin{bmatrix} \dot{U}_{iA}^{(0)} \\ \dot{U}_{iB}^{(0)} \\ \dot{U}_{iC}^{(0)} \end{bmatrix}$$
 (8)

若发生三相对称短路,则上式简化为:

$$\begin{bmatrix} -\dot{I}_{iA} \\ -\dot{I}_{iB} \\ -\dot{I}_{iC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{AA} & 0 & 0 \\ 0 & y_{BB} & 0 \\ 0 & 0 & y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{iA}^{(0)} \\ \dot{U}_{iB}^{(0)} \\ \dot{U}_{iC}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

显然上述结果与文献[15]计算结果完全相同。

2.4 支路电流的计算

故障节点开路电压为:

$$\dot{U}_i^{(0)} = \mathbf{M}_i^T \dot{U}^{(0)} = \mathbf{M}_i^T \mathbf{Z} \mathbf{i}^{(0)} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)则有:

$$\dot{I}_{if} = -\mathbf{Y}_{ABC} \mathbf{M}_i^T \mathbf{Z} \mathbf{i}^{(0)} \quad (11)$$

故障后节点电压列向量为:

$$\dot{U}' = \mathbf{Z} \mathbf{i}' = \mathbf{Z} (\mathbf{i}^{(0)} + \mathbf{i}_i) = \mathbf{Z} (\mathbf{i}^{(0)} + \mathbf{M}_i \mathbf{i}_{if}) \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)得:

$$\dot{U}' = (\mathbf{E} - \mathbf{Z} \mathbf{M}_i \mathbf{Y}_{ABC} \mathbf{M}_i^T) \dot{U}^{(0)} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为 $n \times n$ 阶单位矩阵,每个元素均有 3 个分量。

设电网总支路数为 b ,第 j 条支路阻抗 Z_j 两端节点为 m 和 n ,由式(13)可知,其节点电压 $\dot{U}_m'$ 和 $\dot{U}_n'$ 均为已知,即为 $\dot{U}'$ 中的分量。因此,支路 b 由节点 m 指向节点 n 支路的三相电流可求出:

$$\dot{I}_{jp}' = \frac{\dot{U}_{mp}' - \dot{U}_{np}'}{Z_{jp}} \quad (14)$$

式中: p 取 A,B,C 三相。

3 算例

图 6 所示系统为 IEEE 30 节点系统,系统中有 6 台发电机,36 回线路,4 台变压器。将 IEEE 30 节点数据转换为 PSASP 6.28 版数据,进行潮流计算。

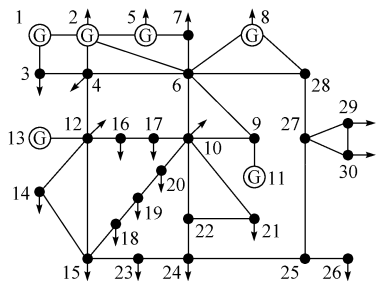


图 6 IEEE 30 节点系统

相短路电流。由于计算中涉及诸多矩阵运算,采用 MATLAB 7.0 进行计算,计算结果见附录 A 图 A1。

可以看出,补偿法与通用法相比,补偿法的计算结果误差均小于 0.1%;在计算速度上,对小系统来说没有明显优势,但随着网络节点数的增加,在计算速度上的优势将更加明显。因此,本算法能更好地满足短路电流的实时计算和监测需要。限于篇幅,本文算法与其他算法比较此处从略。

附录见本刊网络版 (<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] NGUYEN T C, CHAN S, BAILEY R, et al. Auto-check circuit breaker interrupting capabilities[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(1): 24-28.
- [2] 罗为,邱家驹,魏路平. 电力系统断路器遮断容量实时校核[J]. 华东电力, 2004, 32(4): 17-19.
LUO WEI, QIU Jiaju, WEI Luping. Real-time check of circuit breaker interrupting capacity in power system[J]. East China Electric Power, 2004, 32(4): 17-19.
- [3] 王婷婷,许旭峰. 基于 CIM 模型的短路电流实时监视软件[J]. 继电器, 2006, 34(9): 41-44.
WANG Tingting, XU Xufeng. Real-time check of circuit breaker interrupting capacity based on CIM[J]. Relay, 2006, 34(9): 41-44.
- [4] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社, 1995: 20-65.
- [5] 曹国臣,祝滨. 计及网络操作时电网任意复杂故障的简便计算方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 26-29.
CAO Guochen, ZHU Bin. A simple method to calculate any complex faults in power system with variable structures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(16): 26-29.
- [6] 姜彤,张伯明,吕颖. 规范化计算电力系统复杂故障的拓扑描述法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 12-16.
JIANG Tong, ZHANG Boming, LÜ Ying. A topological description method for canonical analysis of complex faults in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 12-16.
- [7] 温苑红,方富祺. 电力系统故障分析的相网络计算[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(2): 35-37.
WEN Yuanhong, FANG Fuqi. Phase network calculate method for power system fault analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(2): 35-37.
- [8] 盛名良. 网孔等值法在短路电流计算中的应用[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(2): 29-31.
SHENG Mingliang. Application of mesh equivalence to short circuit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(2): 29-31.
- [9] 张伯明,杨健. 一种规范化的计算机故障分析计算方法[J]. 清华

根据潮流计算结果,分别采用通用法和本文方法计算节点 24 发生三相接地短路时的短路电流。同理计算 IEEE 57 节点系统和 IEEE 118 节点系统中的节点 24 和 IEEE 10 节点系统中的节点 4 的三

- 大学学报:自然科学版,1995,35(1):32-38.
- ZHANG Boming, YANG Jian. A canonical method for fault analysis[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1995, 35(1): 32-38.
- [10] 车仁飞,李仁俊,李玉忠.基于叠加原理的配电网短路电流计算[J].电力系统自动化,2001,25(24):22-25.
- CHE Renfei, LI Renjun, LI Yuzhong. Short circuit calculation of distribution network on superposition theorem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 22-25.
- [11] 吕文杰.三相短路电流计算方法的探讨[J].四川电力技术,2005,28(5):35-38.
- LÜ Wenjie. Discussion on calculation method of three-phase short-circuit current[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2005, 28(5): 35-38.
- [12] 姜广智.基于三相短路电流的计算机算法[J].科学技术与工程,2008,8(18):5238-5241.
- JIANG Guangzhi. Computer algorithm on the three-phase short-circuit current[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(18): 5238-5241.
- [13] 孙鸣,单永梅.补偿法在继电保护整定计算中的应用[J].电网技术,2003,27(7):28-31.
- SUN Ming, SHAN Yongmei. Application of compensation algorithm in setting software for line protection[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 28-31.
- [14] 诸骏伟.电力系统分析:上册[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [15] 张伯明,陈寿孙,严正.高等电力网络分析[M].2版.北京:清华大学出版社,2007.

但扬清(1983—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统分析与控制。E-mail: danyangqing@yahoo.com.cn

刘文颖(1955—),女,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析与控制及电力系统智能调度。

朱艳伟(1983—),女,博士研究生,主要研究方向:电力电子在电力系统中的应用。

A Fast Algorithm of Short-circuit Current Based on Compensation Method

DAN Yangqing¹, LIU Wenying¹, ZHU Yanwei¹, LI Yang¹, CHENG Lin²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710048, China)

Abstract: A fast algorithm for calculating short-circuit current based on Thevenin's theorem and compensation method is presented. With compensation method, compensation current is introduced in the algorithm into the fault ports for modeling the influence of node short-circuit faults on original network. It can solve the state variable of post-fault network by using nodal admittance matrix of pre-fault network without modification, then solution of the whole network is obtained. Compared with general algorithm, the algorithm proposed can not only compute various short-circuit faults, but also save time for solving post-fault admittance matrix. With faster computing speed and higher precision, the algorithm can better meet the demand of the real-time calculation of short-circuit current.

Key words: admittance model; Thevenin's theorem; compensation method; short circuit fault; fault calculation

附录 A

Untitled			
通用法 补偿法 误差			
10节点			
精度:	27.5701kA	27.5452kA	0.090416%
计算时间:	0ms	0ms	
30节点			
精度:	5.1029kA	5.1027kA	0.0033568%
计算时间:	15ms	0ms	
57节点			
精度:	0.69593kA	0.69593kA	-0.00078772%
计算时间:	48ms	0ms	
118节点			
精度:	13.4583kA	13.4458kA	0.092977%
计算时间:	218ms	0ms	

图 A1 算例分析
Fig.A1 Analysis of examples