

变结构支路短路电流计算的 复合序网法模型研究

罗庆跃¹, 黄大足¹, 王跃球¹, 陈 玮¹, 罗 城²
(1. 邵阳学院 信息与电气工程系, 湖南 邵阳 422004;
2. 广东省输变电工程公司, 广东 广州 510160)

摘要: 提出了一种适合于求流过变结构支路短路电流的复合序网法数学模型, 将开关设备(如断路器)用一条变结构支路模拟, 应用短路故障复合序网分析法的基本原理, 结合现有关于变结构变参数的短路故障分析方法, 能够直接计算在开关设备两侧分别发生短路时, 通过开关设备的短路电流。以 A 相作为参考相, 分三相相间短路、两相相间短路、两相相间短路接地及单相短路接地等 4 种情况建立变结构支路短路电流复合序网法的数学模型。该模型物理意义清晰、建模简单, 在短路故障计算机分析中应用前景广阔。

关键词: 变结构支路; 复合序网法; 短路故障; 计算机分析

中图分类号: TM 713

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)06-0013-04

0 引言

故障分析是继电保护整定计算、电气设备选择及校验的基础。短路故障计算机分析的模型正确与否, 直接关系到继电保护配置的正确性及电力系统的安全稳定运行。文献[1-3]分别从不同的角度论述并给出了在开关设备两侧分别发生短路时, 能够直接计算流过开关设备短路电流的通用数学模型和算法, 为短路电流计算提供了一个快捷而有效的工具, 但未给出适用于短路故障分析的复合序网法的具体数学模型和算法。

本文主要根据文献[1-3]中所提出的关于计算流过变结构支路短路电流的原理, 结合横向短路故障的边界条件及复合序网分析方法, 建立了一种适合于计算在开关设备两侧分别发生各种短路故障时, 流过变结构支路短路电流的复合序网法数学模型。该模型物理意义清晰、建模简单快捷, 在短路故障计算机分析中应用前景广阔。

1 计算原理

由文献[1]可知, 当在开关设备(主要指断路器)两侧发生短路并产生通过开关设备的短路电流, 可将此设备作为一条变结构支路模拟, 且连接于 i, j 节点, 然后将此变结构支路断开(其支路导纳参数为零或阻抗参数为无穷大), 并在其 2 个端点(即 i, j 节点)处分别注入以 A 相作为参考相的短路电流各序分量。由此可得序分量分析法通用数学模型如下:

$$U^{(s)} - (I_{ia(s)} + I_{ja(s)})Z_{ffk(s)} = U_{ia(s)} \quad (1)$$

$$I_{ia(s)}Z_{ffi(s)} - I_{ja(s)}Z_{ffj(s)} = 0 \quad (2)$$

$$U_{ja(s)} = U_{ia(s)} \quad (3)$$

$$Z_{ffi(s)} = \frac{Z_{ii(s)}Z_{jj(s)} - Z_{ij(s)}^2}{Z_{jj(s)} - Z_{ij(s)}}$$

$$Z_{ffj(s)} = \frac{Z_{ii(s)}Z_{jj(s)} - Z_{ij(s)}^2}{Z_{ii(s)} - Z_{ij(s)}}$$

$$Z_{ffk(s)} = \frac{Z_{ffi(s)}Z_{ffj(s)}}{Z_{ffi(s)} + Z_{ffj(s)}}$$

式中 s 为序代号, $s = 1, 2, 0$; $U^{(s)}$ 为短路前 i, j 节点的稳态各序电压, 若考虑短路前电源对称, 则只有正序电压 $U^{(1)}$, 而负序、零序电压均为零, 即 $U^{(2)} = U^{(0)} = 0$; $U_{ia(s)}, U_{ja(s)}$ 分别为短路后 i, j 节点 A 相各序电压分量; $I_{ia(s)}, I_{ja(s)}$ 分别为短路后 i, j 节点的 A 相各序短路电流分量; $Z_{ii(s)}, Z_{jj(s)}, Z_{ij(s)}$ 分别为变结构支路断开后, i, j 节点的各序自阻抗及它们之间的各序互阻抗。

式(1)称为序网方程, 它对各种简单横向短路故障都适用。式(2)(3)为保证因变结构支路断开而对外部电路等效的约束方程。

2 数学模型

根据简单横向短路故障的边界条件及上述计算原理, 并以 A 相作为参考相, 分三相相间短路、两相相间短路、两相相间短路接地及单相短路接地等 4 种情况, 变结构支路短路电流复合序网法的数学模型建立过程讨论如下。

2.1 三相相间短路

发生非金属性三相短路时, 故障节点经过渡阻抗 Z_f 短接, 因短路后系统仍然对称, 故只有正序分量。

短路处的边界条件见图1(a),复合序网见图1(b)。

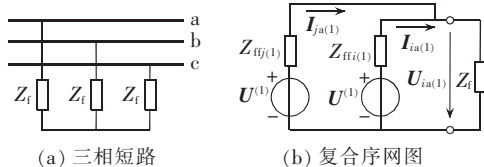


图1 变结构支路的三相短路及其复合序网

Fig.1 The three-phase short-circuit and its compound sequence network of variable structure branch

根据边界条件及通用数学模型可得出三相短路时的复合序网法数学模型如下:

$$\begin{aligned} U^{(1)} - (I_{ia(1)} + I_{ja(1)})Z_{ffk(1)} &= U_{ia(1)} \\ I_{ia(1)}Z_{ffi(1)} - I_{ja(1)}Z_{ffj(1)} &= 0 \\ (I_{ia(1)} + I_{ja(1)})Z_f &= U_{ia(1)} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 两相(BC)相间短路

短路处的边界条件(见图2(a))为

$$\begin{aligned} I_{ia(0)} &= I_{ja(0)} = 0 \\ I_{ia(1)} + I_{ia(2)} + I_{ja(1)} + I_{ja(2)} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$U_{ia(1)} - (I_{ia(1)} + I_{ja(1)})Z_f = U_{ia(2)} - (I_{ia(2)} + I_{ja(2)})Z_f$$

根据边界条件画出其复合序网图,如图2(b)所示。

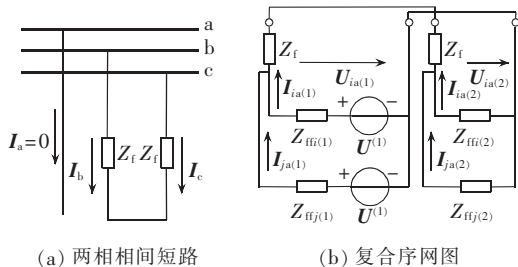


图2 变结构支路的两相短路及其复合序网

Fig.2 The two-phase short-circuit and its compound sequence network of variable structure branch

由此可得出两相相间短路时的复合序网法数学模型如下:

$$\begin{aligned} I_{ia(1)} + I_{ja(1)} &= \frac{U^{(1)}}{Z_{ffk(1)} + Z_{ffk(2)} + 2Z_f} \\ I_{ia(1)} + I_{ja(1)} + I_{ia(2)} + I_{ja(2)} &= 0 \\ I_{ia(1)}Z_{ffi(1)} - I_{ja(1)}Z_{ffj(1)} &= 0 \\ I_{ia(2)}Z_{ffi(2)} - I_{ja(2)}Z_{ffj(2)} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

由上式求出短路点的各序电流分量后,便可利用式(7)求出短路点的各序电压分量和总电流。

$$\begin{aligned} U_{ia(1)} &= U^{(1)} - (I_{ia(1)} + I_{ja(1)})Z_{ffk(1)} \\ U_{ia(2)} &= - (I_{ia(2)} + I_{ja(2)})Z_{ffk(2)} \\ I_{ib} &= a^2 I_{ia(1)} + a I_{ia(2)} \\ I_{jb} &= a^2 I_{ja(1)} + a I_{ja(2)} \end{aligned} \quad (7)$$

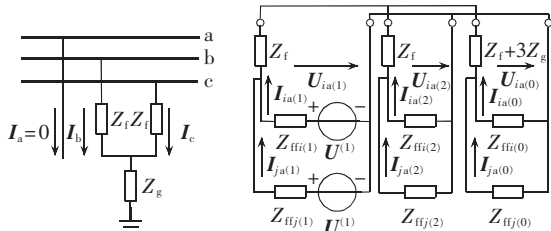
式中 a 为算子, $a = e^{j120^\circ}$; I_{ib} 、 I_{jb} 分别为 i 、 j 节点 B 相的总短路电流。

2.3 两相(BC)相间短路接地

短路处的边界条件(见图3(a))为

$$\begin{aligned} I_{ia(1)} + I_{ia(2)} + I_{ja(1)} + I_{ja(2)} + I_{ia(0)} + I_{ja(0)} &= 0 \\ U_{ia(1)} - (I_{ia(1)} + I_{ja(1)})Z_f &= U_{ia(2)} - (I_{ia(2)} + I_{ja(2)})Z_f \\ U_{ia(1)} - (I_{ia(1)} + I_{ja(1)})Z_f &= U_{ia(0)} - (I_{ia(0)} + I_{ja(0)})(Z_f + 3Z_g) \end{aligned} \quad (8)$$

根据边界条件画出其复合序网图,如图3(b)所示,其中 Z_g 为接地阻抗。



(a) 两相相间短路接地

(b) 复合序网图

图3 变结构支路的两相短路接地及其复合序网

Fig.3 The two-phase grounding and its compound sequence network of variable structure branch

$$\text{令 } Z = \frac{(Z_{ffk(2)} + Z_f)(Z_{ffk(0)} + Z_f + 3Z_g)}{Z_{ffk(2)} + 2Z_f + Z_{ffk(0)} + 3Z_g}, \text{ 由边界条件}$$

及复合序网图可推出两相相间短路接地时的复合序网法数学模型如下:

$$\begin{aligned} I_{ia(1)} + I_{ja(1)} &= U^{(1)} / (Z_{ffk(1)} + Z_f + Z) \\ I_{ia(1)}Z_{ffi(1)} - I_{ja(1)}Z_{ffj(1)} &= 0 \\ I_{ia(2)}Z_{ffi(2)} - I_{ja(2)}Z_{ffj(2)} &= 0 \\ I_{ia(0)}Z_{ffi(0)} - I_{ja(0)}Z_{ffj(0)} &= 0 \\ Z(I_{ia(1)} + I_{ja(1)}) + (Z_{ffk(2)} + Z_f)(I_{ia(2)} + I_{ja(2)}) &= 0 \\ Z(I_{ia(1)} + I_{ja(1)}) + (Z_{ffk(0)} + Z_f + 3Z_g)(I_{ia(0)} + I_{ja(0)}) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

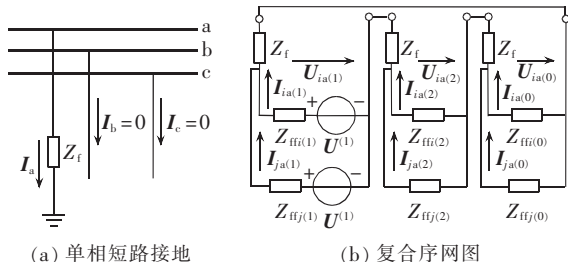
同理,由式(9)求出短路点的各序电流分量后,再根据对称分量法原理,便可求出短路点的各序电压分量和总电流。

2.4 单相(A)短路接地

短路处边界条件(见图4(a))用序分量表示

$$\begin{aligned} I_{ia(1)} + I_{ja(1)} &= I_{ia(2)} + I_{ja(2)} \\ I_{ia(1)} + I_{ja(1)} &= I_{ia(0)} + I_{ja(0)} \\ [U_{ia(1)} - (I_{ia(1)} + I_{ja(1)})Z_f] + [U_{ia(2)} - (I_{ia(2)} + I_{ja(2)})Z_f] + [U_{ia(0)} - (I_{ia(0)} + I_{ja(0)})(Z_f + 3Z_g)] &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

根据边界条件画出复合序网图,如图4(b)所示。



(a) 单相短路接地

(b) 复合序网图

图4 变结构支路的单相短路接地及其复合序网

Fig.4 The single-phase grounding and its compound sequence network of variable structure branch

利用复合序网图,可得出单相短路接地时的复合序网法数学模型如下:

$$I_{ia(1)}+I_{ja(1)}=\frac{U^{(1)}}{Z_{ffk(1)}+Z_{ffk(2)}+Z_{ffk(0)}+3Z_f}$$
$$I_{ia(1)}+I_{ja(1)}=I_{ia(2)}+I_{ja(2)}$$
$$I_{ia(1)}+I_{ja(1)}=I_{ia(0)}+I_{ja(0)}$$
$$I_{ia(1)}Z_{ffi(1)}-I_{ja(1)}Z_{ffj(1)}=0$$
$$I_{ia(2)}Z_{ffi(2)}-I_{ja(2)}Z_{ffj(2)}=0$$
$$I_{ia(0)}Z_{ffi(0)}-I_{ja(0)}Z_{ffj(0)}=0$$

(11)

由式(11)求出短路点的各序电流分量后,便可利用式(12)求出短路点的各序电压分量和总电流。

$$U_{ia(1)}=U^{(1)}-(I_{ia(1)}+I_{ja(1)})Z_{ffk(1)}$$
$$U_{ia(2)}=-(I_{ia(2)}+I_{ja(2)})Z_{ffk(2)}$$
$$U_{ia(0)}=-(I_{ia(0)}+I_{ja(0)})Z_{ffk(0)}$$
$$I_{ia}=I_{ia(1)}+I_{ia(2)}+I_{ia(0)}$$
$$I_{ja}=I_{ja(1)}+I_{ja(2)}+I_{ja(0)}$$

(12)

3 应用实例

如图 5 所示(图中 $T_1\sim T_4$ 为 1~4 号主变; $T'_1\sim T'_4$ 为 1~4 号厂高变; T_{01},T_{02} 为 01,02 号启备变; $G_1\sim G_4$ 为 1~4 号发电机),在 QF_{610} 两侧 k_1,k_2 点分别发生金属性三相、两相相间、两相接地及单相接地短路时,求出流过 QF_{610} 的短路电流。

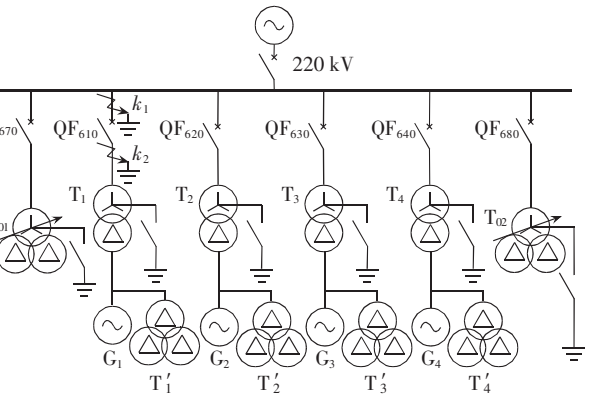


图 5 某大型火力发电厂电气主系统简图

Fig.5 The primary system of a power plant

系统各参数如下(其中电抗为标么值):1、2号发电机 $P_N=200\text{ MW}$, $\lambda=\cos\varphi=0.85$, $U_N=15.75\text{ kV}$, $x_d''=0.146$, 负序电抗 $x_2=0.173$;3、4 号发电机 $P_N=300\text{ MW}$, $\lambda=0.85$, $U_N=20\text{ kV}$, $x_d''=0.157$, 负序电抗 $x_2=0.195$;1、2 号主变 $S_N=240\text{ MV}\cdot\text{A}$, $U_s\%=14$;3、4 号主变 $S_N=370\text{ MV}\cdot\text{A}$, $U_s\%=14.2$ 。220 kV 系统,最大运行方式下,其正序电抗、负序电抗均为 0.014 72,零序电抗为 0.015 86。

运行方式:1~4 号发电机均在额定负荷下运行,1 号和 3 号主变 220 kV 侧中性点刀闸均在运行状态,其他主变 220 kV 侧中性点刀闸均在退出状态。基准值 $S_B=100\text{ MV}\cdot\text{A}$, $U_B=U_{av}$ 。采用变结构支路短路电流计算的复合序网法数学模型,利用计算机分析计算,其结果如表 1 所示。并通过其他计算方法验证,结果完全正确。

表 1 各种故障情况下短路电流计算结果

Tab.1 Calculative currents under different short-circuit faults

故障类型	短路点	$I_{(1)}$	$I_{(2)}$	$I_{(0)}$	kA
三相短路	k_1				2.085 2
	k_2				25.197 6
两相短路	k_1	1.021 9	-0.970 7		1.725 7
	k_2	12.349 2	-12.400 4		21.433 8
两相短路 接地	k_1	1.375 6	-0.647 8	-1.464 3	2.532 3
	k_2	16.623 2	-8.275 3	-7.611 4	24.572 7
单相短路 接地	k_1	0.680 7	0.646 6	1.436 9	2.764 2
	k_2	8.225 5	8.259 6	7.469 3	23.954 4

注: $I_{(1)},I_{(2)},I_{(0)}$ 分别为正序、负序、零序电流分量; $|I|$ 为故障相短路电流绝对值。

4 结论

本文利用参考文献[1~12]所提出的关于求流过变结构支路(即开关设备,如断路器等)短路电流的方法、原理,结合短路故障的边界条件和对称分量分析方法,建立了适用于在开关设备两侧分别发生各种短路故障时,求通过开关设备短路电流的复合序网法数学模型,是参考文献[1~3]中所提出模型的一个重要补充。该模型物理意义清晰,建模简单,在短路故障计算机分析中应用前景广阔。

参考文献:

[1] 罗庆跃,李晓明,吴俊. 变结构模型发电厂主系统电流计算方法[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):71-74.
LUO Qing-yue,LI Xiao-ming,WU Jun. Calculation method of short-circuit current for power plant master system with variable structure model[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(7):71-74.

[2] 罗庆跃,李晓明,余国鸿,等. 零阻抗支路在短路故障计算机分析中的应用[J]. 电工技术学报,2005,20(4):107-110.
LUO Qing-yue,LI Xiao-ming,SHE Guo-hong,et al. Application of zero impedance branch for computer's analyses on short-circuit fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(4):107-110.

[3] 罗庆跃,李晓明. 变结构模型短路电流计算方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(1):77-80.
LUO Qing-yue,LI Xiao-ming. A novel algorithm of short-circuit current with variable structure model[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(1):77-80.

[4] 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 Bo-ming,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.

[5] 曹国臣,傅旭. 辐射状配电网故障分析计算的解耦相分量法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):15-20.
CAO Guo-chen,FU Xu. A decoupling phase domain method to calculate faults in a radial distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(4):15-20.

[6] 曹国臣,张弓,宋家骅,等. 配电网故障计算的通用算法[J]. 中国电机工程学报,1999,19(7):41-44,48.
CAO Guo-chen,ZHANG Gong,SONG Jia-hua,et al. Canonical method for calculating faults in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(7):41-44,48.

- [7] 尹建华,江道灼,韩祯祥. 电力系统故障分析的一种新型实用计算机分析算法及在 BPA 暂态程序中的实现[J]. 中国电机工程学报,1999,19(3):71-76.
- YIN Jian-hua,JIANG Dao-zhuo,HAN Zhen-xiang. New practical algorithm and its application in BPA for power system fault analysis[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(3):71-76.
- [8] 王春,陈允平,谈顺涛. 电力系统复杂故障通用算法的研究[J]. 中国电机工程学报,1995,15(6):417-422.
- WANG Chun,CHEN Yun-ping,TAN Shun-tao. The study of generalized algorithm for simultaneous faults in power system [J]. Proceedings of the CSEE,1995,15(6):417-422.
- [9] 曹国臣. 变结构电力系统任意复杂故障的快速计算[J]. 中国电机工程学报,1995,15(5):334-340.
- CAO Guo-chen. Fast calculation of any complex fault in power system with variable structures [J]. Proceedings of the CSEE,

1995,15(5):334-340.

- [10] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [11] 何仰赞,温增银. 电力系统分析[M]. 3 版. 武汉:华中理工大学出版社,2002.
- [12] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 3 版. 北京:中国电力出版社,1998.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

罗庆跃(1961-),男,湖南邵东人,副教授,从事电力系统及其自动化专业的教学和科研工作(E-mail:luo610718@163.com);

黄大足(1968-),男,湖南武冈人,副教授,从事计算机软件的教学与开发工作。

Study on compound sequence network model of short-circuit current calculation for variable structure branch

LUO Qing-yue¹,HUANG Da-zu¹,WANG Yue-qiu¹,CHEN Wei¹,LUO Cheng²

(1. Shaoyang College, Shaoyang 422004, China; 2. Guangdong Provincial Transmission and Distribution Engineering Company, Guangzhou 510160, China)

Abstract: A compound sequence network mathematic model is proposed to figure out the short-circuit current through the variable structure branch, using a variable structure branch to simulate the switching equipment (such as breaker, etc.). Applying the basic principle of the short-circuit fault compound sequence network analytical method and combined the short-circuit fault analytical method of variable structure and parameter, the short-circuit current through the switching equipment when short-circuit happens at one side of it can be calculated. With phase A as reference, its mathematics model is constructed for the three-phase short-circuit, two-phase short-circuit, two-phase grounding, single-phase grounding respectively. With clear physical meaning and easy modeling, the model has wide application prospects in the field of short-circuit fault analysis on computer.

This project is supported by the Foundation of Education Office of Hunan Province(05C668).

Key words: variable structure branch; compound sequence network; short-circuit fault; computer analysis