

采用相位修正法进行多电压 等级电网故障计算

武汉水利电力学院 王 春

摘要: 本文为具有不同电压等级电网的故障计算提供了一种新方法。其计算结果能反应电网的实际接线状况,并可分别计算电网中各种不同结线变压器(如 $Y_0/\Delta-11$)各侧电气量,以满足电力系统继电保护整定和校验的需要。

关键词 电网故障计算 相位修正法 实数矩阵

一 引言

随着电力系统规模不断增大,用人工手算进行继电保护的整定和校验越来越困难。因此,人们借助于计算机进行适合于继电保护的故障分析。在故障计算程序中,均把实际的电力系统化为标么值网络进行计算,其优点是使计算得到简化,但不足之处在于物理概念不如有名值明确,特别是对变压器支路的处理,不能反映其实际接线。我们知道,电力系统大量采用 $Y_0/\Delta-11$, $Y/\Delta-11$, $Y_0/\gamma-12$ 等接线变压器,其特点是不但各侧电气量数值不同,而且相位也可能不同。例如 $Y_0/\Delta-11$ 结线变压器,在 Y_0 侧发生不对称故障, Δ 侧的正序分量超前 Y_0 侧正序分量 30° ; Δ 侧的负序分量则滞后 Y_0 侧 30° ; Y_0 侧有零序分量,而 Δ 侧没有。用标么值计算时,对变压器支路处理为:用它的漏抗串联一个无损耗、无相移的理想变压器来模拟,这样,考虑电阻为零所形成的节点导纳矩阵、节点阻抗矩阵均可用实数矩阵表示,计算速度快,节省内存。显然,网络所计算的故障信息,仅对发生故障的那一级电网有效,而对于经相移变压器联系的不同电压等级的电网,不能反映其实际状况。而继电保护整定和校验中,常常要用到不同电压等级的故障信息。例如距离II段必须躲过线末变电站降压变压器低压侧短路时的测量阻抗;校验保护灵敏度时,常求变压器低压侧短路时流过高压侧的各相电流等。所以,开发实用性强,特别能满足继电保护需要的故障计算程序十分必要。

二 理论分析

我们先以某一网络进行分析,然后再推广到一般情况。

某双侧电源,环形网络如图1—1所示,图中变压器均为 $Y_0/\Delta-11$ 结线。其正(负)序网络、零序网络见图1—2、图1—3。

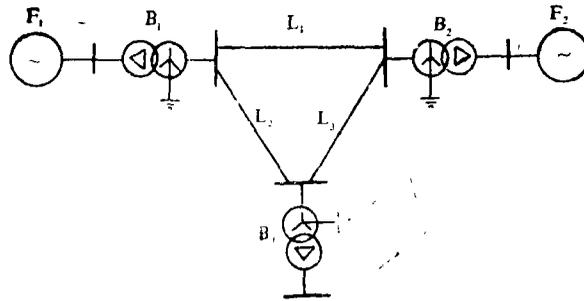


图1—1 网络接线图

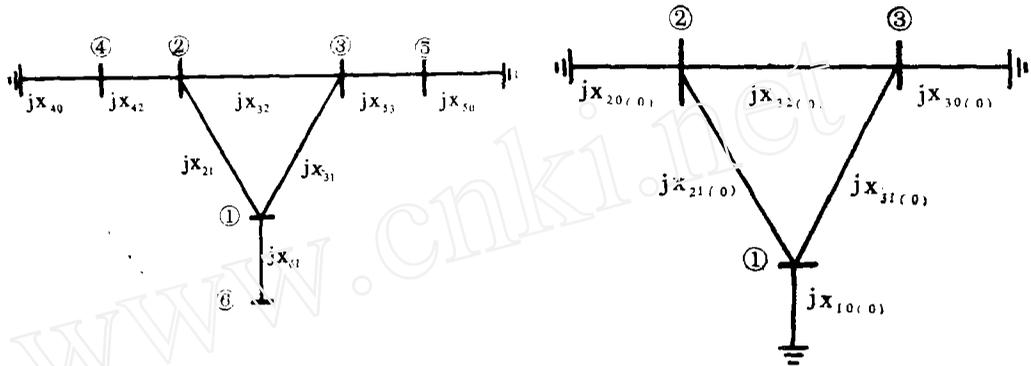


图1—2 正(负)序网络(标么值)

图1—3 零序网络(标么值)

根据图 1—2、图 1—3 可形成六阶的正(负)序阻抗矩阵和三阶的零序阻抗矩阵。两矩阵均为实数对称矩阵。图 1—2、图 1—3 中圆圈中数字为节点编号。

1. 设故障前空载,且不对称故障发生在节点 3,且以故障点故障前电压为参考,以求节点 2 和节点 4 各序电压和变压器 B_1 各侧各序电流为例进行分析。

不考虑变压器 B_1 相移时故障前节点电压为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1^{(0)} &= 1.0 \angle 0^\circ \\ \dot{U}_2^{(0)} &= 1.0 \angle 0^\circ \\ \dot{U}_4^{(0)} &= 1.0 \angle 0^\circ \end{aligned} \quad (1-1)$$

考虑 B_1 相移时故障前节点电压为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1R}^{(0)} &= 1.0 \angle 0^\circ \\ \dot{U}_{2R}^{(0)} &= 1.0 \angle 0^\circ \\ \dot{U}_{4R}^{(0)} &= 1.0 \angle 30^\circ \end{aligned} \quad (1-2)$$

即变压器 B_1 Δ 侧节点 4 故障前电压超前 Y 侧节点 2 故障前电压 30° 。

如果故障点的各序故障电流已计算出,分别为 $\dot{I}_{3(0)}$ 、 $\dot{I}_{3(1)}$ 、 $\dot{I}_{3(2)}$ 。则不考虑 B_1 相移时节点 2 和节点 4 的各序电压为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{2(0)} = Z_{23(0)} \dot{I}_{3(0)} \\ \dot{U}_{2(1)} = \dot{U}_{2(1)}^{(0)} + Z_{23(1)} \dot{I}_{3(1)} \\ \dot{U}_{2(2)} = Z_{23(1)} \dot{I}_{3(2)} \end{cases} \quad (1-3)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{4(0)} = Z_{43(0)} \dot{I}_{3(0)} = 0 \quad (\text{可认为 } Z_{43(0)} = 0) \\ \dot{U}_{4(1)} = \dot{U}_{4(1)}^{(0)} + Z_{43(1)} \dot{I}_{3(1)} \\ \dot{U}_{4(2)} = Z_{43(1)} \dot{I}_{3(2)} \end{cases} \quad (1-4)$$

式(1-3)、(1-4)中阻抗均为节点阻抗矩阵中的元素。考虑 B_1 相移后节点 2、4 各序电压为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{2.R(0)} = \dot{U}_{2(0)} \\ \dot{U}_{2.R(1)} = \dot{U}_{2(1)} \\ \dot{U}_{2.R(2)} = \dot{U}_{2(2)} \end{cases} \quad (1-5)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{4.R(0)} = 0 \\ \dot{U}_{4.R(1)} = \dot{U}_{4(1)}^{(0)} + Z_{43(1)} \dot{I}_{3(1)} e^{j30^\circ} = [\dot{U}_{4(1)}^{(0)} + Z_{43(1)} \dot{I}_{3(1)}] e^{j30^\circ} \\ \quad = \dot{U}_{4(1)} e^{j30^\circ} \\ \dot{U}_{4.R(2)} = Z_{43(1)} \dot{I}_{3(2)} e^{-j30^\circ} = [Z_{43(1)} \dot{I}_{3(2)}] e^{-j30^\circ} = \dot{U}_{4(2)} e^{-j30^\circ} \end{cases} \quad (1-6)$$

由式(1-5)、(1-6)不难看出,考虑变压器移相后各节点电压应对不考虑相移的各节点电压(标么值计算)进行相位修正,方能符合实际。例如在 $Y_0/\Delta-11$ 变压器的 Y_0 侧电网发生故障,且以故障点故障前电压为参考量,则 Y_0 侧各节点各序电压不修正,而 Δ 侧各节点各序电压应进行相位修正,(正序超前 30° ,负序滞后 30°);同理,在 Δ 侧发生故障时, Δ 侧各节点电压不修正,而 Y_0 侧各节点各序电压应修正相位,(正序滞后 30° ,负序超前 30°)而零序电压可不修正,这是因为零序网络已考虑零序电流的路径,已在转移阻抗上反映,例如 Y_0 侧的零序分量不能转换到 Δ 侧去。除非接线为 Y_0/Y_0 ,零序电流方能贯通。

虽然是通过前面实例分析,但其结论具有普遍意义。除具有特别接线变压器电网外,目前 10.5 千伏及以上电网均可分为 Δ 侧电网和 Y_0 (或 Y) 侧电网,上述结论可直接应用。

2. 变压器 B_1 两侧各序电流的计算

前面我们已求出节点 2 和节点 4 上的各序电压,进而可求出流过变压器 B_1 两侧的各序电流。设 $\dot{I}_{B2(0)}$ 、 $\dot{I}_{B2(1)}$ 、 $\dot{I}_{B2(2)}$ 和 $\dot{I}_{B4(0)}$ 、 $\dot{I}_{B4(1)}$ 、 $\dot{I}_{B4(2)}$ 分别为从 Y_0 侧和从 Δ 侧流入变压器 B_1 的正、负、零序电流,且 $Z_{B1} = Z_{B2} = Z_{B0}$ 为变压器的各序阻抗,有:

$$\begin{cases} \dot{I}_{B2(0)} = \frac{\dot{U}_{2 \cdot R(0)}}{Z_{B0}} \\ \dot{I}_{B2(1)} = \frac{\dot{U}_{2 \cdot R(1)} - \dot{U}_{4 \cdot R(1)} e^{-j30^\circ}}{Z_{B1}} \\ \dot{I}_{B2(2)} = \frac{\dot{U}_{2 \cdot R(2)} - \dot{U}_{4 \cdot R(2)} e^{j30^\circ}}{Z_{B1}} \end{cases} \quad (1-7)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{B4(0)} = 0 \\ \dot{I}_{B4(1)} = \frac{\dot{U}_{4 \cdot R(1)} - \dot{U}_{2 \cdot R(1)} e^{j30^\circ}}{Z_{B1}} \\ \dot{I}_{B4(2)} = \frac{\dot{U}_{4 \cdot R(2)} - \dot{U}_{2 \cdot R(2)} e^{-j30^\circ}}{Z_{B1}} \end{cases} \quad (1-8)$$

3. 根据变压器接线类型分析各侧正序、负序分量

通过以上实例,再考虑一般情况。设I、J分别为变压器两侧节点编号,按变压器接线可分为三类。

(1) 变压器接线为Y/Y-12, Y₀/Y-12, Y₀/Y₀-12, Y/Y₀-12

对此类接线,两侧正序、负序分量同相,可当作线路处理。设 $\dot{I}_{BI(1)}$ 、 $\dot{I}_{BI(2)}$ 和 $\dot{I}_{BJ(1)}$ 、 $\dot{I}_{BJ(2)}$ 分别为从I侧、J侧流入变压器的正、负序电流; $\dot{U}_{I(1)}$ 、 $\dot{U}_{I(2)}$ 和 $\dot{U}_{J(1)}$ 、 $\dot{U}_{J(2)}$ 分别为I侧、J侧节点正序、负序电压, Z_{IJ1} 为变压器的正序阻抗,有

$$\begin{cases} \dot{I}_{BI(1)} = \frac{\dot{U}_{I(1)} - \dot{U}_{J(1)}}{Z_{IJ1}} \\ \dot{I}_{BI(2)} = \frac{\dot{U}_{I(2)} - \dot{U}_{J(2)}}{Z_{IJ1}} \end{cases} \quad (1-9)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{BJ(1)} = -\dot{I}_{BI(1)} \\ \dot{I}_{BJ(2)} = -\dot{I}_{BI(2)} \end{cases}$$

(2) 变压器接线为Y₀/Δ-11, Y/Δ-11。即I侧为Y₀或Y, J侧为Δ, 有:

$$\begin{cases} \dot{I}_{BI(1)} = \frac{\dot{U}_{I(1)} - \dot{U}_{J(1)} e^{-j30^\circ}}{Z_{IJ1}} \\ \dot{I}_{BI(2)} = \frac{\dot{U}_{I(2)} - \dot{U}_{J(2)} e^{j30^\circ}}{Z_{IJ1}} \end{cases} \quad (1-10)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{BJ(1)} = \frac{\dot{U}_{J(1)} - \dot{U}_{I(1)} e^{j30^\circ}}{Z_{IJ1}} \\ \dot{I}_{BJ(2)} = \frac{\dot{U}_{J(2)} - \dot{U}_{I(2)} e^{-j30^\circ}}{Z_{IJ1}} \end{cases}$$

(3) 变压器接线为 $\Delta-11/Y_0$, $\Delta-11/Y$, 即I侧为 Δ , J侧为 Y_0 或 Y , 有:

$$\begin{cases} \dot{I}_{BI(1)} = \frac{\dot{U}_{I(1)} - \dot{U}_{J(1)} e^{j30^\circ}}{Z_{IJ1}} \\ \dot{I}_{BJ(2)} = \frac{\dot{U}_{J(2)} - \dot{U}_{I(2)} e^{-j30^\circ}}{Z_{IJ1}} \end{cases} \quad (1-11)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{BJ(1)} = \frac{\dot{U}_{J(1)} - \dot{U}_{I(1)} e^{-j30^\circ}}{Z_{IJ1}} \\ \dot{I}_{BI(2)} = \frac{\dot{U}_{I(2)} - \dot{U}_{J(2)} e^{j30^\circ}}{Z_{IJ1}} \end{cases}$$

(4) 对特殊接线变压器如 $Y/Y-6$, 可采用相位的相位修正。

4. 零序电流在变压器各侧分布分析

设 $Z_{IJ(0)}$ 为从I侧看到J侧的变压器零序阻抗, $Z_{I(0)}$ 和 $Z_{J(0)}$ 分别为从I侧和J侧看进去的(到大地)的零序阻抗。 $\dot{U}_{I(0)}$ 和 $\dot{U}_{J(0)}$ 分别为I和J侧节点零序电压, $\dot{I}_{BI(0)}$ 和 $\dot{I}_{BJ(0)}$ 分别为从I侧和J侧流入变压器的零序电流。例如对 $Y_0/\Delta-11$ 接线, I侧为 Y_0 , J侧为 Δ , 有 $Z_{IJ(0)}$ 为无穷大, $Z_{I(0)}=Z_B$, $Z_{J(0)}$ 为无穷大。

(1) 如果I侧零序电压 $\dot{U}_{I(0)} \neq 0$ 和J侧零序电压 $\dot{U}_{J(0)} \neq 0$, 且 $Z_{IJ(0)}$ 为确定值, 则有:

$$\dot{I}_{BI(0)} = \frac{\dot{U}_{I(0)} - \dot{U}_{J(0)}}{Z_{IJ(0)}}, \quad \dot{I}_{BJ(0)} = -\dot{I}_{BI(0)}$$

(2) 如果 $Z_{IJ(0)} = \infty$, 且 $\dot{U}_{I(0)} = 0$ 或 $Z_{I(0)} = \infty$, 则有:

$$\dot{I}_{BI(0)} = 0$$

同理: 当 $\dot{U}_{J(0)} = 0$ 或 $Z_{J(0)} = \infty$, 则

$$\dot{I}_{BJ(0)} = 0$$

(3) 如果 $Z_{IJ(0)} = \infty$, 但 $\dot{U}_{I(0)} \neq 0$ 和 $Z_{I(0)} = Z_B$, 则

$$\dot{I}_{BI(0)} = \frac{\dot{U}_{I(0)}}{Z_{I(0)}}$$

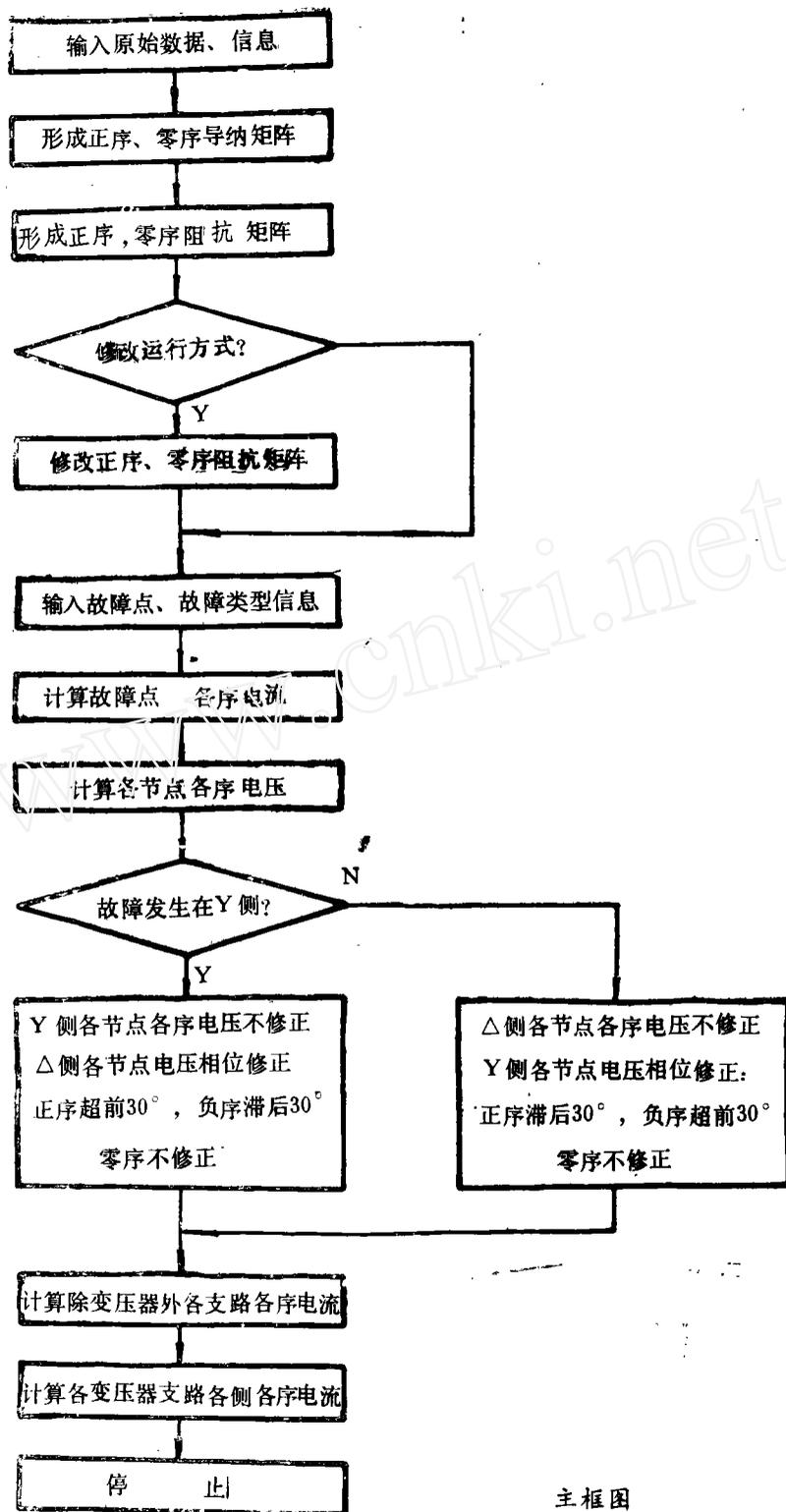
同理: 当 $\dot{U}_{J(0)} \neq 0$ 和 $Z_{J(0)} = Z_B$, 则

$$\dot{I}_{BJ(0)} = \frac{\dot{U}_{J(0)}}{Z_{J(0)}}$$

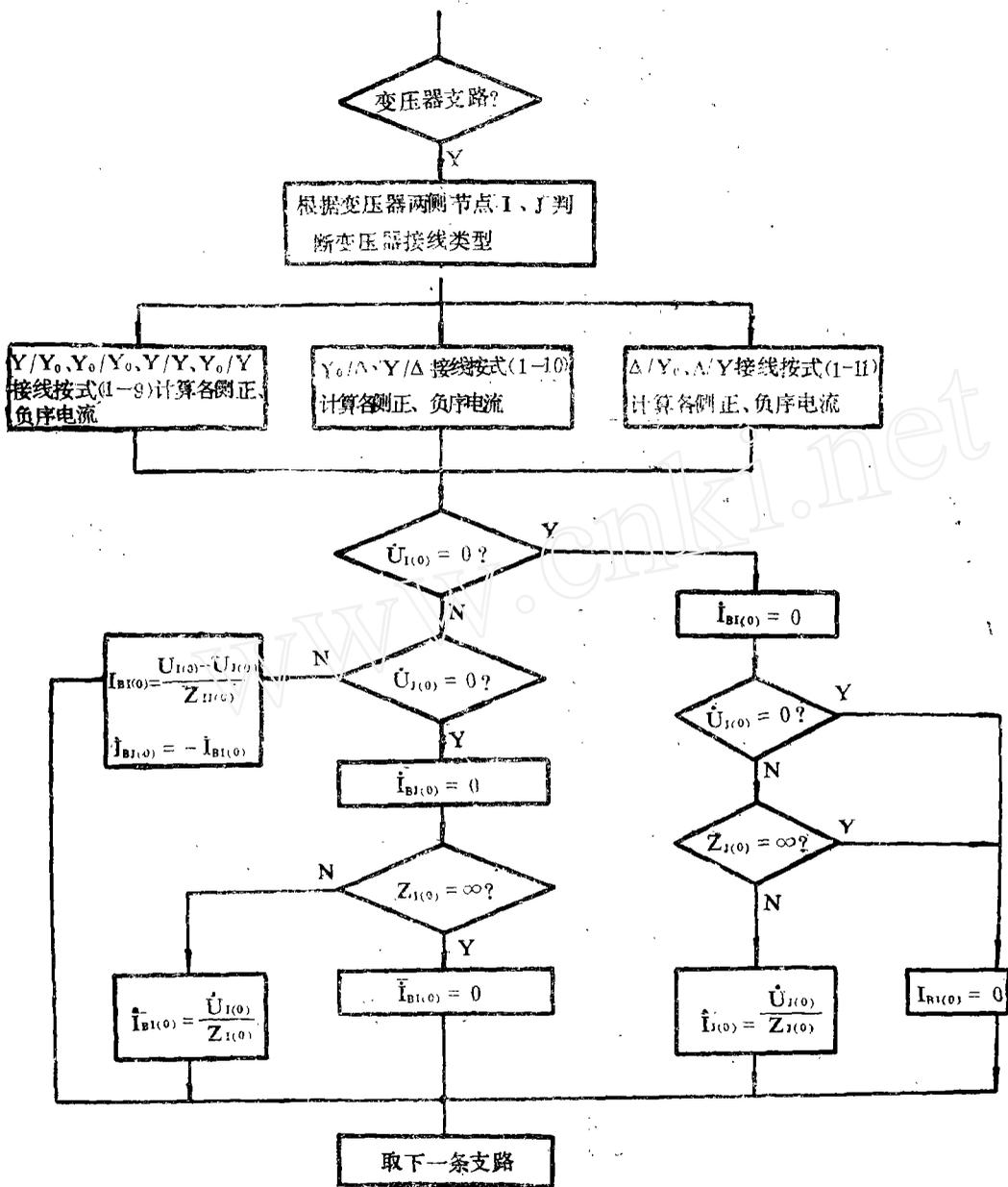
综上所述, 变压器各侧各序电流均已求出, 进而可计算出各侧各相全电流。

三 程序框图

根据以上分析, 编制了程序, 在IBM机上通过。主框图如下。另外附加计算变压器支路各侧各序电流的框图。



主框图



计算变压器支路各侧各序电流框图

四 实例计算

计算网络见图(1-1)、(1-2)、(1-3), 具体参数如下:

$$\begin{aligned}
 X_{21(1)} &= 0.25 & X_{42(1)} &= 0.015 & X_{13(1)} &= 0.05 & X_{21(0)} &= 0.7 \\
 X_{31(1)} &= 0.35 & X_{56(1)} &= 0.02 & X_{23(0)} &= 0.015 & X_{31(0)} &= 1.0 \\
 X_{32(1)} &= 0.3 & X_{53(1)} &= 0.03 & X_{30(1)} &= 0.03 & X_{32(0)} &= 0.75 \\
 X_{46(1)} &= 0.02 & X_{61(1)} &= 0.05 & & & &
 \end{aligned}$$

以上参数均为标么值。

所形成的正(负)序节点阻抗矩阵、零序阻抗矩阵如下:

	0.16642	0.02046	0.02076	0.01169	0.00830	0.16642
	0.02046	0.00076	0.00614	0.01754	0.00245	0.02046
	0.02076	0.00614	0.04122	0.00350	0.01649	0.02076
i	0.01169	0.01754	0.00350	0.01859	0.00140	0.01169
	0.00830	0.00245	0.01649	0.00140	0.01859	0.00830
	0.16642	0.02046	0.02076	0.01169	0.00830	0.21642
	0.04470	0.00094	0.00128			
j	0.00094	0.01443	0.00056			
	0.00128	0.00056	0.02809			

设在节点2发生两相接地短路, 计算结果如下:

表4-1 两相接地短路时各节点电压(修正前)

		节点号					
		1	2	3	4	5	6
故障点	序						
	零	0.01585	0.24230	0.00950	0	0	0
	节点2 正	0.49486	0.24230	0.84846	0.56702	0.93938	0.49486
	负	0.16153	0.24230	0.04846	0.13845	0.01938	0.16153

表4-2 两相接地短路时各节点电压(修正后)

		节点号					
		1	2	3	4	5	6
故障点	序						
	零	0.01585 / 0°	0.24230 / 0°	0.00950 / 0°	0	0	0
	节点2 正	0.49486 / 0°	0.24230 / 0°	0.84846 / 0°	0.56702 / -30°	0.93938 / -30°	0.49486 / -30°
	负	0.16153 / 0°	0.24230 / 0°	0.04846 / 0°	0.13845 / -30°	0.01938 / -30°	0.16153 / -30°

表 4—3 通过除变压器外各支路电流

节点号		2—1	3—1	3—2
故障点	序			
节点 2	零	0.32349∠-90°	0.00635∠90°	0.31039∠90°
	正	1.01026∠90°	1.01026∠-90°	2.02053∠90°
	负	0.32306∠-90°	0.32306∠90°	0.64613∠90°

表 4—4 通过变压器各支路各侧电流

故障点		变压器支路序	B ₁ (4—2)		B ₂ (5—3)		B ₃ (6—1)	
			△侧 (节点4)	Y ₀ 侧 (节点2)	△侧 (节点5)	Y ₀ 侧 (节点3)	△侧 (节点6)	Y ₀ 侧 (节点1)
节点 2	零	0	16.15338 ∠-90°	0	0.31675 ∠-90°	0	0.31713 ∠-90°	
	正	21.64808 ∠-60°	21.64808 ∠90°	3.03073 ∠-60°	3.03073 ∠90°	0	0	
	负	6.92257 ∠60°	6.92257 ∠-90°	0.96918 ∠60°	0.96918 ∠-90°	0	0	

五 结束语

(1) 采用相位修正方法进行多电压等级的电网故障计算, 速度快, 因为大部分计算可用实数进行, 占内存较少, 计算结果符合电网实际接线, 并可分别计算变压器各侧故障电流。

(2) 本文对双卷变压器的分析, 不难推广到三卷变压器。

(3) 本文仅讨论了电力系统常用的变压器接线方式。如考虑特殊接线变压器, 要对程序稍加修改。

(4) 适用于多电压等级电网的故障计算, 不但能满足继电保护的需要, 而且具有较广泛的实用意义。

参考文献

- [1] P.M.安德逊. 电力系统故障分析. 电力工业出版社, 1980年.
- [2] 华北电力学院. 电力系统故障分析. 水利电力出版社, 1980年.
- [3] 西安交通大学等. 电力系统计算. 水利电力出版社, 1978年.
- [4] 崔秀梅等, MS—FORTRAN77程序设计语言. 中南工业大学出版社, 1987年.