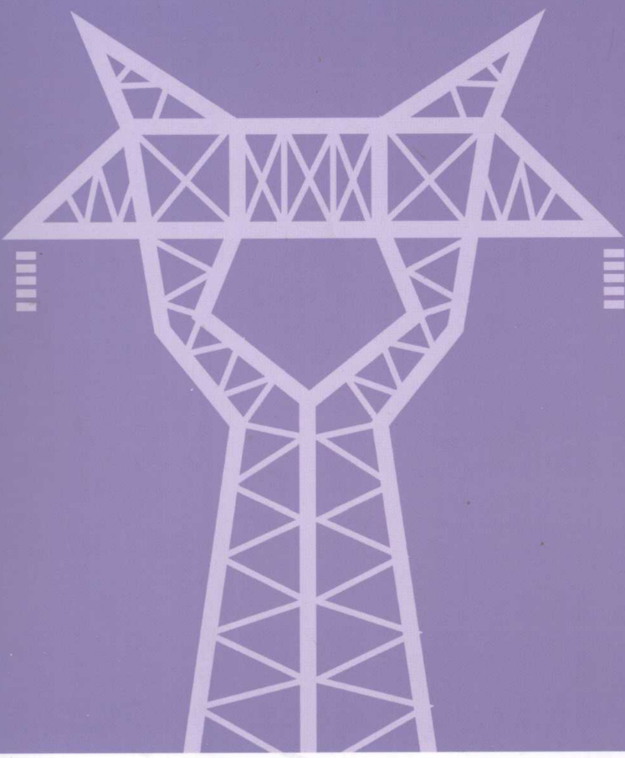
Relay Protection

电力系统继电保护

习题集

梁振锋　康小宁　编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS
www.cepp.com.cn

Relay Protection

电力系统继电保护习题集

梁振锋　康小宁　编

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为了帮助读者更好地学习和掌握继电保护原理，进一步满足继电保护课程的教学需要，编写了《电力系统继电保护习题集》。本习题集参照最新教材、收集了大量资料、体现了最新内容，从不同角度选取了具有典型意义的例题、习题和思考题。

本习题集内容共分10章，包括电力系统故障分析、电力系统继电保护概论、电网电流保护、电网距离保护、输电线路纵联保护、自动重合闸、电力变压器保护、发电机保护、母线保护、数字式继电保护基础。各章基本按照内容概要、例题分析、习题与思考题、习题与思考题参考答案四个部分编排，内容详实、分析细致，有助于读者进一步巩固所学的知识，加深对继电保护技术和原理的理解与掌握。

本习题集主要作为电气工程及其自动化、电力系统及其自动化和其他相关专业的本科辅导教材，也可作为高职、高专相关专业的辅导教材，亦可供考研学生和从事电力系统及其自动化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电力系统继电保护习题集/梁振锋，康小宁编．—北京：中国电力出版社，2008
ISBN 978-7-5083-6818-4

Ⅰ．电…　Ⅱ．①梁…②康…　Ⅲ．电力系统-继电保护-习题　Ⅳ．TM77-44

中国版本图书馆CIP数据核字（2008）第033239号

中国电力出版社出版、发行
（北京三里河路6号　100044　http://www.cepp.com.cn）
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售
*
2008年9月第一版　　2008年9月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米　16开本　13.25印张　323千字
印数0001—3000册　　定价**26.00**元

前言

近年来，随着微机保护的推广应用，继电保护技术发生了革命性的变化。为了适应继电保护技术的发展和人才培养的需要，近年来相继出版的电力系统继电保护教材有十几种之多，每种教材都各具特色并面向不同的读者对象。这些教材反应了继电保护技术近年来的发展情况，如2005年出版的《电力系统继电保护》（张保会、尹项根主编）和《微型机继电保护基础》（杨奇逊、黄少锋编著）。本习题集是为了进一步满足继电保护课程教学需要而编写的辅助教材。

本习题集共10章，包括电力系统故障分析、电力系统继电保护概论、电网电流保护、电网距离保护、输电线路纵联保护、自动重合闸、电力变压器保护、发电机保护、母线保护、数字式继电保护基础。在编写过程中力求使本习题集具有以下特点：

（1）新。在选择题目和习题解答方面，尽可能参考了最新的参考资料，改编、新编了许多习题。

（2）全。在编写过程中，力求以不同的内容、从不同的角度，来帮助读者学习和掌握继电保护原理。参考了大量文献资料，除了本书“参考文献”所列文献外，还参考了许多未公开出版的资料，主要包括原华北电力学院的《电力系统继电保护习题集》、华中科技大学的《继电保护整定计算题解》、原成都科技大学的《电力系统继电保护原理思考题和习题》等。另外，在教学过程中，发现许多学生对“电力系统故障分析”掌握得不够扎实，影响对继电保护课程的学习和掌握，于是增加了相关内容。

（3）详。书中对所选题目（尤其是例题）都给出了详细解答，为解答同类型题目提供了思路和方法，能够满足不同层次读者的需求。

西安交通大学康小宁编写了第七章至第十章，其余部分的编写及统稿由西安理工大学梁振锋完成。全书由西安交通大学索南加乐教授审阅。

在本书的编写过程中，得到了许多同事及朋友的鼓励和支持，在资料收集方面宁联辉提供了很大的帮助，在此表示感谢。由于编者水平所限，个别习题的提法及其答案难免有不当之处，甚至有错误，恳请广大读者提出宝贵意见。

编者

2008年9月

目 录

第一章

电力系统故障分析

一、内容概要

电力系统故障分析是合理地配置各种继电保护，并正确地整定其参数的基础。电力系统故障分析也是分析、研究、改善继电保护动作性能的重要手段。因此在本书中编写了电力系统故障分析的内容。电力系统故障分析的内容十分丰富，本书只是选编了部分典型例题和习题。

二、例题分析

例 1－1　某电力系统如图 1－1 所示，发电机 G1 和 G2 参数相同，各元件参数已在图中标出。

（1）取基准功率 $S_B=100MVA$，基准电压 $U_B=U_{av}$，计算各元件的标幺值参数。

（2）当在网络中的 K 点发生三相短路时，求短路点的次暂态电流 I''、冲击电流 i_{imp} 和短路容量 S_{kt} 的有名值。

（3）求上述情况下流过发电机 G1 和 G2 的冲击电流 i_{imp} 的有名值。

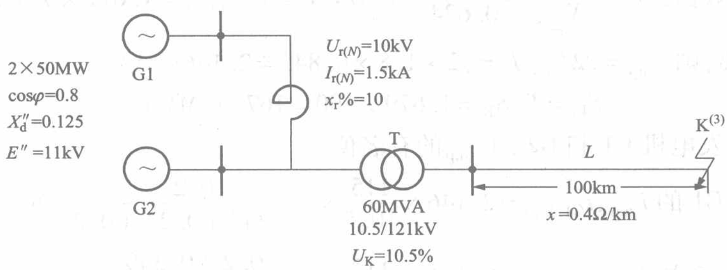


图 1－1　例 1－1 题图

［**解题分析**］标幺制使电力系统故障分析运算步骤简单，数值简明且便于分析。元件的标幺值参数计算是电力系统分析的基础。

由于快速继电保护的应用，在电力系统三相短路电流的工程计算中，计算短路电流基频交流分析的初始值（即次暂态电流 I''）比较重要。

解：（1）计算各元件参数在统一基准下的标幺值。

各电压等级的基准值为

$$U_{B(1)}=10.5\text{kV},I_{B(1)}=\frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B(1)}}=\frac{100}{\sqrt{3}\times10.5}\approx5.499(\text{kA})$$

$$U_{B(2)}=115\text{kV},I_{B(2)}=\frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B(2)}}=\frac{100}{\sqrt{3}\times115}\approx0.502(\text{kA})$$

各元件的参数标幺值为

发电机 G1 和 G2，$E''_{*}=\dfrac{E''}{U_{B(1)}}=\dfrac{11}{10.5}\doteq 1.048$，$x''_{d*}=x''_{d}\dfrac{S_B}{S_N}=0.125\times\dfrac{100}{50/0.8}=0.2$

电抗器，$x_{r*}=\dfrac{x_r\%}{100}\dfrac{I_{B(1)}}{I_{r(N)}}\dfrac{U_{r(N)}}{U_{B(1)}}=\dfrac{10}{100}\times\dfrac{5.499}{1.5}\times\dfrac{10}{10.5}\doteq 0.349$

变压器 T，$x_{T*}=\dfrac{U_k\%}{100}\dfrac{S_B}{S_N}\left(\dfrac{U_N}{U_B}\right)^2=\dfrac{10.5}{100}\times\dfrac{100}{60}=0.175$

输电线路 L，$x_{L*}=\dfrac{x_L}{x_B}=x_L\dfrac{S_B}{U_B^2}=(0.4\times 100)\times\dfrac{100}{115^2}\doteq 0.302$

等值网络如图 1－2（a）所示。化简后的网络如图 1－2（b）所示。

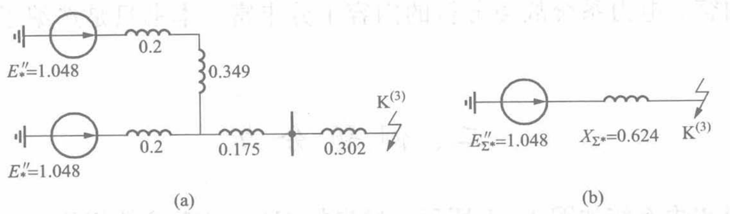


图 1－2　等值网络图

（a）化简前；（b）化简后

$$E''_{\Sigma*}=1.048, X_{\Sigma*}=(0.2/\!/0.549)+0.175+0.302\doteq 0.624$$

（2）求短路点的 I''、i_{imp} 和 S_{kt}。

周期分量有效值：$I''_{*}=\dfrac{E''_{\Sigma*}}{X_{\Sigma*}}=\dfrac{1.048}{0.624}\doteq 1.679$，$I''=I''_{*}I_{B(2)}=1.679\times 0.502\doteq 0.843\,(\text{kA})$

取 $K_{imp}=1.8$，则 $i_{imp}=\sqrt{2}K_{imp}I''=\sqrt{2}\times 1.8\times 0.843\doteq 2.146\,(\text{kA})$

$$S_{kt}=I''_{*}S_B=1.679\times 100=167.9\,(\text{MVA})$$

（3）求流过发电机 G1 和 G2 的 i_{imp} 的有名值。

流过发电机 G1 的 i_{imp}，$i_{G1.imp}=2.146\times\dfrac{115}{10.5}\times\dfrac{0.2}{(0.349+0.2)+0.2}\doteq 6.276\,(\text{kA})$

流过发电机 G2 的 i_{imp}，$i_{G1.imp}=2.146\times\dfrac{115}{10.5}\times\dfrac{0.2+0.349}{(0.349+0.2)+0.2}\doteq 17.228\,(\text{kA})$

例 1－2　图 1－3 所示的系统中一回线停运，另一回线路发生接地故障，试做出其零序网络图。

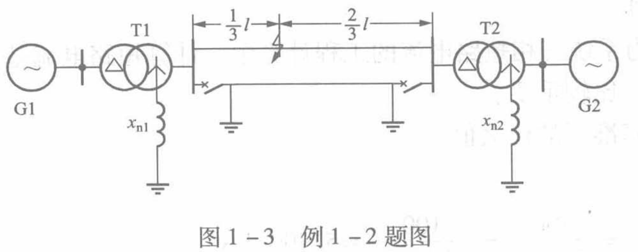


图 1－3　例 1－2 题图

［**解题分析**］对于两回线具有零序互感的平行线路，在制订零序网络时应计及零序互感的影响。分为两种情况：

（1）能够找到公共节点并且各支路间互感又一样的情况，可用“直接去耦法”来建立无互感的等值网络，如图 1－4 所示。

（2）当有互感的支路难于找到连在一起的公共节点时（如本例）。可先求出对应这部分网络的节点导纳矩阵，然后再根据节点导纳矩阵中的诸元素来建立与之对应的等值网络，如

图 1－5 所示。图 1－5 中各参数为

$$a=\frac{x_1x_2-x_m^2}{x_2},\ b=\frac{x_1x_2-x_m^2}{x_1},\ c=-d=\frac{x_1x_2-x_m^2}{x_m}。$$

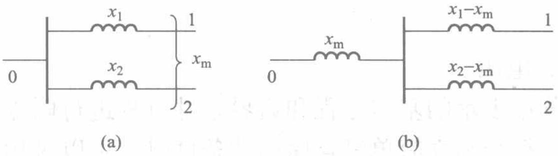


图 1－4 直接去耦法
（a）去耦前；（b）去耦后

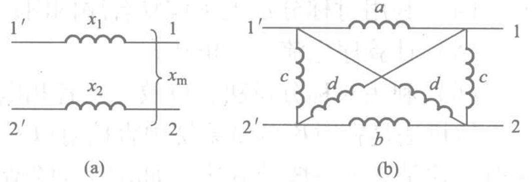


图 1－5 间接方法
（a）去耦前；（b）去耦后

解：

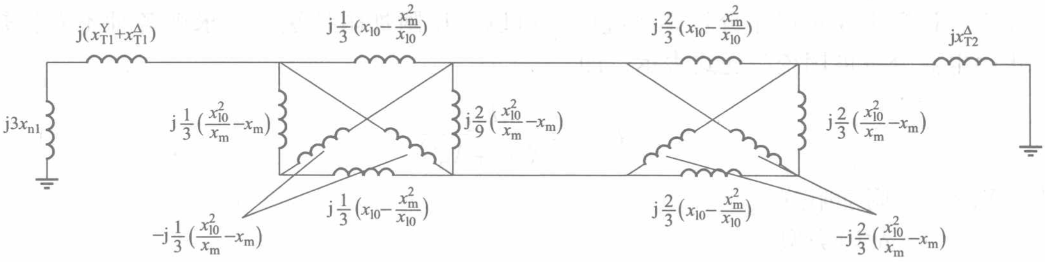


图 1－6 例题 1－2 答案图

例 1－3 如图 1－7 所示的电力系统，当 K 点发生 $K_b^{(1)}$、$K_{bc}^{(2)}$ 金属性短路故障时，试分别计算短路瞬间故障点的短路电流和各相电压，并绘制其相量图；当 K 点发生 $K_{bc}^{(1,1)}$ 金属性短路故障时，试计算短路瞬间故障点的正序短路电流。系统中各元件的参数如下：发电机 G，$S_N=120$MVA，$U_N=10.5$kV，$E_1=1.67$，$x_1=0.9$，$x_2=0.45$；变压器 T1，$S_N=60$MVA，$U_k\%=10.5$，$k_1=10.5/115$；变压器 T2，$S_N=60$MVA，$U_k\%=10.5$，$k_1=115/6.3$；线路 L，每回线路长 $l=105$km，$x_1=0.4\Omega$/km，$x_0=3x_1$；负荷 LD1，$S_N=60$MVA，$x_1=1.2$，$x_2=0.35$；负荷 LD2，$S_N=40$MVA，$x_1=1.2$，$x_2=0.35$。

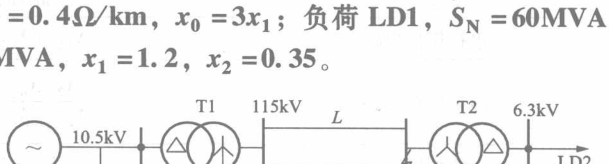


图 1－7 例 1－3 题图

［**解题分析**］电力系统中大多数故障为不对称故障，分析不对称故障时应用较多的方法是对称分量法。在应用对称分量法进行计算时，首先要计算各元件的序参数；然后制订电力系统故障时的各独立序网络（要注意不同的故障序网络可能也不同）。在此基础上分析不对称故障有三种具体方法：复合序网法、解析法、附加阻抗法。

复合序网法是分析、计算不对称故障的有力工具。复合序网直观、便于分析，不过并不是任何条件下都能得出较简单的复合序网。一般允许的条件是：金属性短路；断相处断口电阻为无穷大；故障处有过渡电阻时，故障处的三相在连接形式和阻抗参数上须有两相情况一样。在这些情况下可以建立简单的复合序网，求解起来简单方便，否则建立和求解复合序网都会很困难。复合序网法有以下几个步骤：

(1) 确定基准相;

(2) 列写以相量表示的边界条件方程;

(3) 利用对称分量法将边界条件方程转换为以对称分量表示的边界条件;

(4) 利用对称分量关系作复合序网图;

(5) 计算序电流、序电压;

(6) 利用对称分量法合成故障点各相电流、电压。

解析法是在对称分量系统中直接对以对称分量表示的基本方程和边界条件方程进行联立求解。这是更为一般的方法,如故障点的情况不符合建立简单复合序网的条件时,可以采用之。解析法有以下几个步骤:

(1) 列写序网的三个基本方程式和三个边界条件方程,其中边界条件方程以对称分量来表示;

(2) 联立求解,获得其解答。

在工程计算中仅对正序分量感兴趣时,可以采用附加阻抗法。在求解各种不对称短路时,正序电流分量可用统一通式表示,即

$$\dot{I}_{a1}^{(n)}=\frac{\dot{E}_{\Sigma}}{X_{1\Sigma}+X_{\Delta}^{(n)}} \tag{1-1}$$

式中 $X_{\Delta}^{(n)}$——附加阻抗;

(n)——故障类型。

式(1-1)表明:在简单不对称短路时,短路点的正序分量电流 $\dot{I}_{a1}^{(n)}$ 与在短路点增接一个附加阻抗 $X_{\Delta}^{(n)}$ 而发生三相短路时的电流相等,即附加阻抗接入到正序网络中短路点和大地之间的端口。附加阻抗的数值见表 1-1。短路点故障相电流的绝对值总是和短路点的正序电流成正比,即

$$I_{k}^{(n)}=m^{(n)}I_{k1}^{(n)}$$

表 1-1　短路点的附加阻抗

短路类型 (n)	附加阻抗	比例系数 $m^{(n)}$
单相接地短路	$X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}$	3
两相接地短路	$\dfrac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}$	$\sqrt{3}\times\sqrt{1-\dfrac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})^2}}$
两相短路	$X_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$

在求解断线故障时,也可以用附加阻抗法。此种情况下附加阻抗就接入到正序网络的断线故障形成的断口处。附加阻抗的数值见表 1-2。

表 1-2　断线故障时断口的附加阻抗

断线类型	附加阻抗
单相断线	$X_{2\Sigma}\times X_{0\Sigma}/(X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})$
两相断线	$X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}$

需要指出的是,以上三种方法只是对称分量法分析不对称故障的不同表示形式。

解:(1) 参数计算。选取基准功率 $S_B=120\text{MVA}$,基准电压 $U_B=U_{av}$。

$$U_B = 115\text{kV}, I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} = \frac{120}{\sqrt{3}\times 115} \doteq 0.602(\text{kA})$$

其他计算过程略。计算结果标示于各序网络中。

（2）确定各序网络如图 1－8 所示。

（3）进行网络化简，并求正序组合电动势和各序组合电抗。

正序网络：按图 1－8（a）进行网络化简，化简过程如图 1－9 所示，图中 E_7、E_8 是化简过程中的等效电动势。最终得 $E_\Sigma \doteq 0.951$，$X_{1\Sigma} \doteq 0.827$。

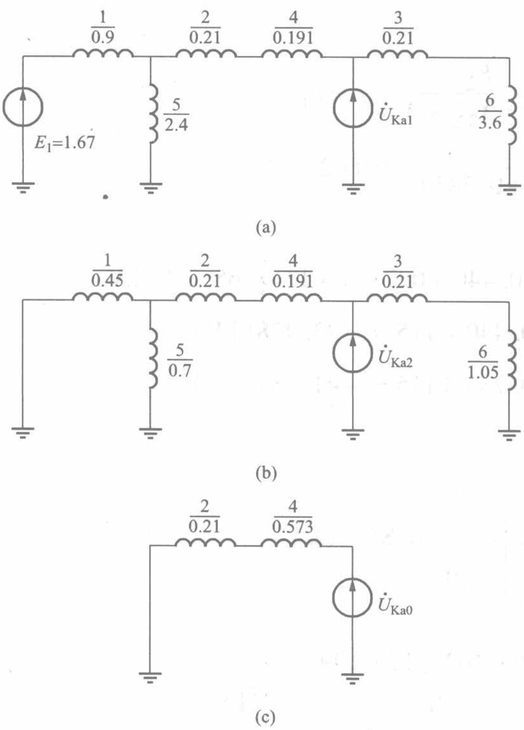


图 1－8　K 点发生不对称短路故障时的正、负、零序等值电路

（a）正序等值电路；（b）负序等值电路；（c）零序等值电路

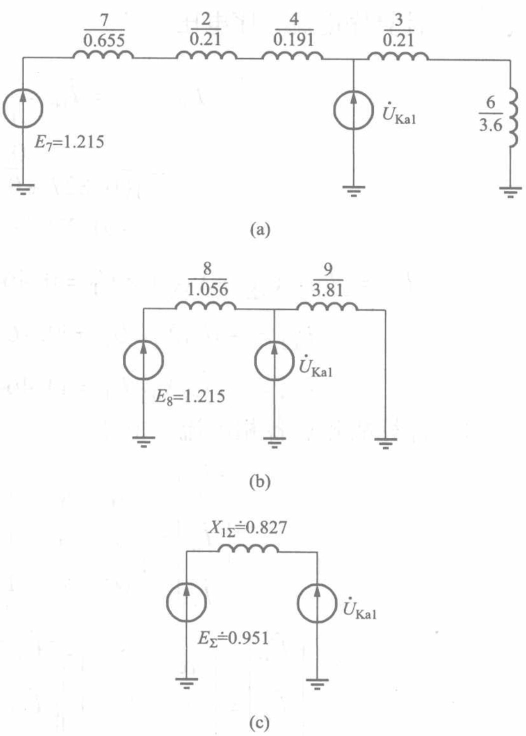


图 1－9　正序网络化简过程

负序网络：网络化简图略，$X_{2\Sigma} \doteq 0.440$。

零序网络：网络化简图略，$X_{0\Sigma} = 0.783$。

（4）短路电流计算。

1）单相接地故障 $K_b^{(1)}$（复合序网法）。

a）选择 b 相为基准相；

b）短路点以相量表示的边界条件方程为

$$\dot{I}_a = 0, \dot{I}_c = 0, \dot{U}_b = 0$$

c）将边界条件方程转换为对称分量关系，由

$$\begin{cases}\alpha\dot{I}_{b1}+\alpha^2\dot{I}_{b2}+\dot{I}_{b0}=0\\ \alpha^2\dot{I}_{b1}+\alpha\dot{I}_{b2}+\dot{I}_{b0}=0\\ \dot{U}_{b1}+\dot{U}_{b2}+\dot{U}_{b0}=0\end{cases}$$

得

$$\begin{cases}\dot{I}_{b1}=\dot{I}_{b2}=\dot{I}_{b0}\\ \dot{U}_{b1}+\dot{U}_{b2}+\dot{U}_{b0}=0\end{cases}$$

d）作复合序网图，如图 1－10 所示。

e）计算序电流、序电压。

$$\begin{aligned}\dot{I}_{b1}=\dot{I}_{b2}=\dot{I}_{b0}&=\frac{\dot{E}_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})}\times I_B\\ &=\frac{0.951}{j(0.827+0.440+0.783)}\times 0.602\\ &\doteq -j0.279(kA)\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{b1}=j\dot{I}_{b1}(X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})\times U_B=0.464\times(0.440+0.783)\times 115\doteq 65.259(kV)$$

$$\dot{U}_{b2}=-j\dot{I}_{b1}X_{2\Sigma}U_B=j0.464\times j0.440\times 115\doteq -23.478(kV)$$

$$\dot{U}_{b0}=-j\dot{I}_{b1}X_{0\Sigma}U_B=j0.464\times j0.783\times 115\doteq -41.781(kV)$$

f）计算故障点各相电流、电压。

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_a\\ \dot{I}_b\\ \dot{I}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\alpha & \alpha^2 & 1\\ 1 & 1 & 1\\ \alpha^2 & \alpha & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{b1}\\ \dot{I}_{b2}\\ \dot{I}_{b0}\end{bmatrix}\doteq\begin{bmatrix}0\\ -j0.837\\ 0\end{bmatrix}(kA)$$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_a\\ \dot{U}_b\\ \dot{U}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\alpha & \alpha^2 & 1\\ 1 & 1 & 1\\ \alpha^2 & \alpha & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_{b1}\\ \dot{U}_{b2}\\ \dot{U}_{b0}\end{bmatrix}\doteq\begin{bmatrix}99.163\angle 129.199^\circ\\ 0\\ 99.163\angle -129.199^\circ\end{bmatrix}(kV)$$

g）短路点电流、电压相量图如图 1－11 所示。

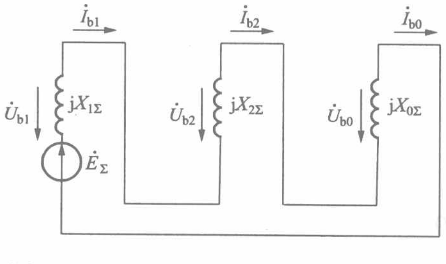


图 1－10　b 相单相接地故障复合序网图

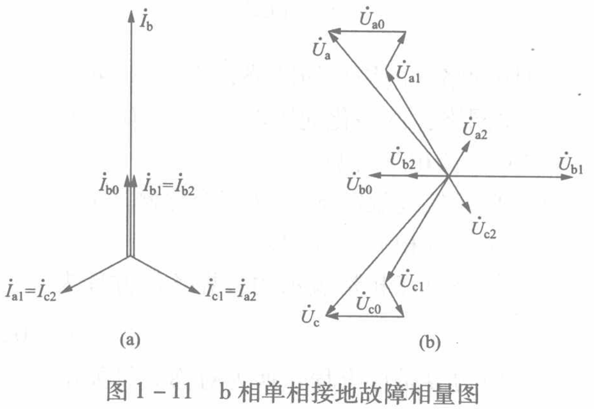


图 1－11　b 相单相接地故障相量图

2）两相故障 $K_{bc}^{(2)}$（解析法）。

a）列写方程。序网的基本方程式为

$$\begin{cases}\dot{U}_{a1}=\dot{E}_{\Sigma}-j\dot{I}_{a1}X_{1\Sigma}=0.951-j\dot{I}_{a1}\times 0.827\\ \dot{U}_{a2}=-j\dot{I}_{a2}X_{2\Sigma}=-j\dot{I}_{a2}\times 0.440\\ \dot{U}_{a0}=-j\dot{I}_{a0}X_{0\Sigma}=-j\dot{I}_{a0}\times 0.783\end{cases} \tag{1-2}$$

边界条件方程式为

$$\begin{cases}\dot{I}_{a1}=-\dot{I}_{a2}\\ \dot{I}_{a0}=0\\ \dot{U}_{a1}=\dot{U}_{a2}\end{cases} \tag{1-3}$$

b）联立求解式（1－2）和式（1－3），得

$$\dot{I}_{a1}=\dot{I}_{a1}I_B\doteq -j1.479\text{kA},\dot{I}_{a2}=j1.479\text{kA},\dot{I}_{a0}=0$$

$$\dot{U}_{a1}=\dot{U}_{a2}=(\dot{E}_{\Sigma}-j\dot{I}_{a1}X_{1\Sigma})\times U_B=(0.951-j\dot{I}_{a1}\times 0.827)\times 115$$
$$\doteq -31.295(\text{kV}),\dot{U}_{a0}=0$$

c）计算故障点各相电流、电压。

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_a\\ \dot{I}_b\\ \dot{I}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1\\ \alpha^2&\alpha&1\\ \alpha&\alpha^2&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{a1}\\ \dot{I}_{a2}\\ \dot{I}_{a0}\end{bmatrix}\doteq\begin{bmatrix}0\\ -2.562\\ 2.562\end{bmatrix}(\text{kA})$$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_a\\ \dot{U}_b\\ \dot{U}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1\\ \alpha^2&\alpha&1\\ \alpha&\alpha^2&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_{a1}\\ \dot{U}_{a2}\\ \dot{U}_{a0}\end{bmatrix}\doteq\begin{bmatrix}-62.590\\ 31.295\\ 31.295\end{bmatrix}(\text{kV})$$

d）短路点电流、电压相量图如图 1－12 所示。

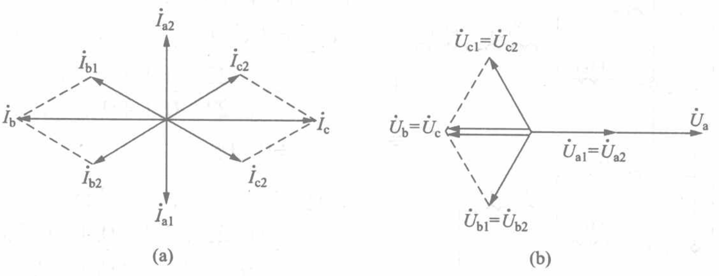


图 1－12 bc 相接地故障相量图

3）两相接地故障 $K_{bc}^{(1,1)}$（附加阻抗法）。

附加阻抗 $X_{\Delta}^{(1,1)}=\dfrac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}=\dfrac{0.440\times 0.783}{0.440+0.783}\doteq 0.282$

比例系数 $m^{(1,1)}=\sqrt{3}\sqrt{1-\dfrac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})^2}}=\sqrt{3}\sqrt{1-\dfrac{0.440\times 0.783}{(0.440+0.783)^2}}\doteq 1.520$

$$I_{a1}=\frac{E_{\Sigma}}{X_{1\Sigma}+X_{\Delta}^{(1,1)}}I_{B}=\frac{0.951}{0.827+0.282}\times 0.602\doteq 0.517(\mathrm{kA})$$

$$I_{K1}=m^{(1,1)}I_{a1}=1.520\times 0.517\doteq 0.786(\mathrm{kA})$$

例 1-4　如图 1-13 所示电力系统，当 K 点发生 A 相断开时，试计算断开相的断口电压和非断开相电流。系统各元件参数如下：发电机 G：$S_N=300\mathrm{MVA}$，$U_N=10\mathrm{kV}$，$E_1=1.67$，$x''_d=x_2=0.22$；变压器 T1：$S_N=360\mathrm{MVA}$，$U_k\%=12$；变压器 T2：$S_N=360\mathrm{MVA}$，$U_k\%=12$；线路：每回线 $l=120\mathrm{km}$，$x_1=0.4\Omega/\mathrm{km}$，$x_0=3x_1$；负荷 LD：$S_N=300\mathrm{MVA}$，$X_1=1.2$，$X_2=0.35$。

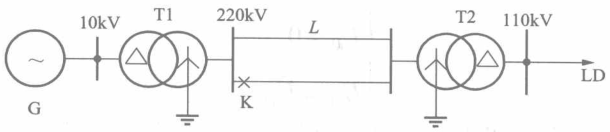


图 1-13　例 1-4 题图

［**解题分析**］本例题的分析和计算方法见例题 1-3 的解题分析。

解：（1）参数计算。

选取基准功率 $S_B=300\mathrm{MVA}$，基准电压 $U_B=U_{av}$，$I_{B1}=\frac{S_B}{\sqrt{3}U_B}=\frac{300}{\sqrt{3}\times 230}\doteq 0.753\mathrm{kA}$

$$x''_d=x_2=0.22;X_{T1}=\frac{U_k\%}{100}\times\frac{S_B}{S_N}=\frac{12}{100}\times\frac{300}{360}=0.1,X_{T2}=0.1$$

$$X_{L1}=x_1 l\frac{S_B}{U_{av}^2}=0.4\times 120\times\frac{300}{230^2}\doteq 0.272;X_{L0}=3X_{L1}\doteq 0.816$$

$$X_{LD1}=1.2,X_{LD2}=0.35$$

（2）确定各序网络及复合序网，复合序网图如图 1-14 所示。

（3）进行网络化简，并求各序组合电抗和断口断开前的电压。

$$X_{1\Sigma}=(x''_d+X_{T1.1}+X_{T2.1}+X_{LD1})//X_{L1}+X_{L1}$$
$$=\frac{(0.22+0.1+0.1+1.2)\times 0.272}{0.22+0.1+0.1+1.2+0.272}+0.272$$
$$\doteq 0.505$$

$$X_{2\Sigma}=(x_2+X_{T1.1}+X_{T2.1}+X_{LD2})//X_{L1}+X_{L1}$$
$$=\frac{(0.22+0.1+0.1+0.35)\times 0.272}{0.22+0.1+0.1+0.35+0.272}+0.272$$
$$\doteq 0.473$$

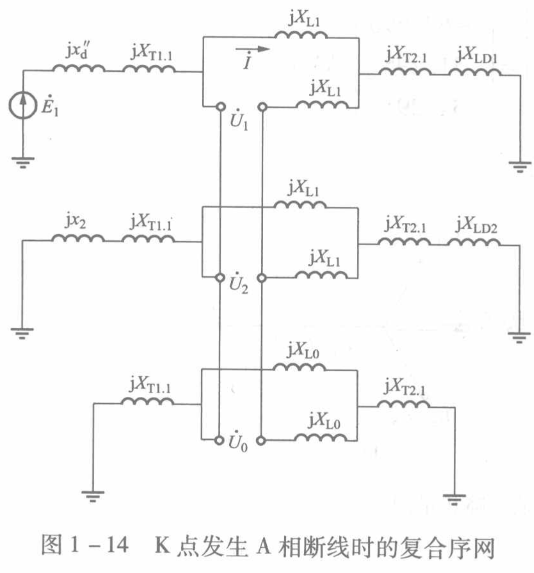


图 1-14　K 点发生 A 相断线时的复合序网

$$X_{0\Sigma}=(X_{T1.1}+X_{T2.1})//X_{L0}+X_{L0}=\frac{(0.1+0.1)\times 0.816}{0.1+0.1+0.816}+0.816\doteq 0.977$$

$$\dot{U}_{qk|0|}=\dot{I}\cdot jX_{L1}=\frac{\dot{E}_1}{j(x''_d+X_{T1.1}+X_{T2.1}+X_{LD1}+X_{L1})}\times jX_{L1}$$

$$=\frac{1.67\times0.272}{0.22+0.1+0.1+1.2+0.272}\doteq0.240$$

（4）计算故障断口的正序、负序、零序电流。

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}_{qk|0|}}{j(X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma}/\!/X_{0\Sigma})}=\frac{0.240}{j(0.505+0.473/\!/0.977)}=-j0.291$$

$$\dot{I}_2=\frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\times\dot{I}_1=\frac{0.977}{0.473+0.977}\times(-j0.291)=-j0.196$$

$$\dot{I}_0=\frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\times\dot{I}_1=\frac{0.473}{0.473+0.977}\times(-j0.291)=-j0.095$$

（5）计算故障断口电压和非故障相电流。A 相断开电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_a&=\dot{U}_1+\dot{U}_2+\dot{U}_0=3\dot{U}_1=3\times j(X_{2\Sigma}/\!/X_{0\Sigma})\dot{I}_1U_B\\&=3\times0.319\times0.291\times230\doteq64.052(\text{kV})\end{aligned}$$

非故障相电流（利用对称分量法求解）为

$$\begin{aligned}\dot{I}_b&=[\alpha^2\dot{I}_1+\alpha\dot{I}_2+\dot{I}_0]I_{B1}=[\alpha^2\times(-j0.291)+\alpha\times(-j0.196)-j0.095]\times0.753\\&\doteq0.128\angle118.827^\circ(\text{kA})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_c&=[\alpha\dot{I}_1+\alpha^2\dot{I}_2+\dot{I}_0]I_{B1}=[\alpha\times(-j0.291)+\alpha^2\times(-j0.196)-j0.095]\times0.753\\&\doteq0.128\angle61.173^\circ(\text{kA})\end{aligned}$$

例 1－5　如图 1－15（a）所示电力系统，K 点经过渡电阻发生短路故障，假定各序等值网络为已知，试组成对应的复合序网。

［**解题分析**］过渡电阻对继电保护的动作行为有影响，因此本例题具有实际意义。求解本例题采用的方法是对称分量法，具体步骤为：

（1）写出 abc 系统中的边界条件方程；

（2）写出对称分量表示的边界条件方程；

（3）寻找对称分量之间的关系，绘制复合序网图。

解： 首先对短路点的过渡电阻作等效变换，处理为在虚拟母线 K′点发生图 1－15（b）所示的故障。K′点在 abc 系统中的边界条件方程为

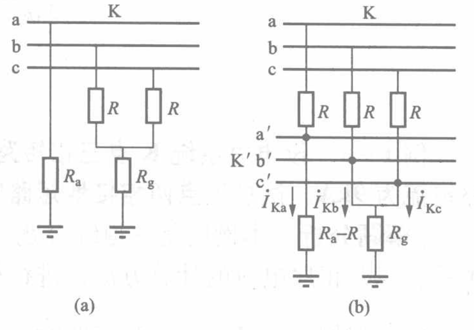


图 1－15　例 1－5 题图

$$\begin{cases}\dot{U}_{K'b}=\dot{U}_{K'c}=(\dot{I}_{Kb}+\dot{I}_{Kc})R_g\\\dot{U}_{K'a}=\dot{I}_{Ka}(R_a-R)\end{cases}$$

在故障处的三相中，因为 b、c 两相情况相同，故选 a 相为基准相，利用对称分量法求解以对称分量表示的边界条件。

$$\begin{aligned}\dot{U}_{K'a0}&=\frac{1}{3}(\dot{U}_{K'a}+\dot{U}_{K'b}+\dot{U}_{K'c})=\frac{1}{3}[\dot{I}_{Ka}(R_a-R)+2(\dot{I}_{Kb}+\dot{I}_{Kc})R_g]\\&=\frac{1}{3}[\dot{I}_{Ka}(R_a-R)+2(\dot{I}_{Ka}+\dot{I}_{Kb}+\dot{I}_{Kc})R_g-2\dot{I}_{Ka}R_g]\\&=\frac{1}{3}[\dot{I}_{Ka}(R_a-R-2R_g)+6\dot{I}_{Ka0}R_g]\\&=(\dot{I}_{Ka1}+\dot{I}_{Ka2}+\dot{I}_{Ka0})\left[\frac{1}{3}(R_a-R-2R_g)\right]+2\dot{I}_{Ka0}R_g\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{K'a1}=\dot{U}_{K'a2}&=\frac{1}{3}(\dot{U}_{K'a}-\dot{U}_{K'b})=\frac{1}{3}[\dot{I}_{Ka}(R_a-R)-(\dot{I}_{Kb}+\dot{I}_{Kc})R_g]\\&=\frac{1}{3}[\dot{I}_{Ka}(R_a-R)-(\dot{I}_{Ka}+\dot{I}_{Kb}+\dot{I}_{Kc})R_g+3\dot{I}_{Ka}R_g-2\dot{I}_{Ka}R_g]\\&=\frac{1}{3}[\dot{I}_{Ka}(R_a-R-2R_g)-3\dot{I}_{Ka0}R_g+3\dot{I}_{Ka}R_g]\\&=(\dot{I}_{Ka1}+\dot{I}_{Ka2}+\dot{I}_{Ka0})\left[\frac{1}{3}(R_a-R-2R_g)\right]-\dot{I}_{Ka0}R_g+(\dot{I}_{Ka1}+\dot{I}_{Ka2}+\dot{I}_{Ka0})R_g\\&=(\dot{I}_{Ka1}+\dot{I}_{Ka2}+\dot{I}_{Ka0})\left[\frac{1}{3}(R_a-R-2R_g)\right]+(\dot{I}_{Ka1}+\dot{I}_{Ka2})R_g\end{aligned}$$

整理，得

$$\begin{cases}\dot{U}_{K'a0}-2\dot{I}_{Ka0}R_g=(\dot{I}_{Ka1}+\dot{I}_{Ka2}+\dot{I}_{Ka0})\left[\frac{1}{3}(R_a-R-2R_g)\right]\\\dot{U}_{K'a1}-(\dot{I}_{Ka1}+\dot{I}_{Ka2})R_g=(\dot{I}_{Ka1}+\dot{I}_{Ka2}+\dot{I}_{Ka0})\left[\frac{1}{3}(R_a-R-2R_g)\right]\\\dot{U}_{K'a1}=\dot{U}_{K'a2}\end{cases}\tag{1-4}$$

根据式（1－4）可将各序等值网络连接成如图1－16所示的复合序网。

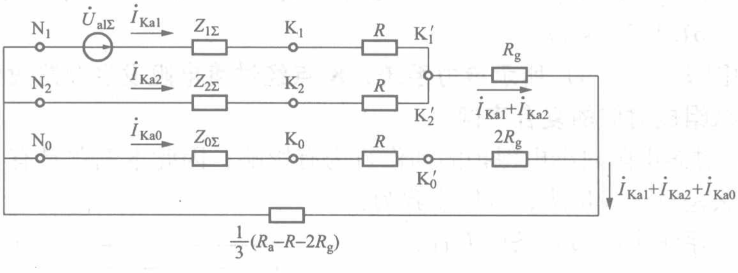


图1－16　复合序网

例1－6　设电力系统K点三相短路电流为6kA，两相短路电流为$4\sqrt{3}$kA，单相接地短路电流为9kA，试求该点两相接地短路时的短路电流。

［**解题分析**］本例题是一道综合题。根据各种故障情况时，故障电流和正序电流之间的关系，以及正序电流的计算方法，进行推算即可得出结果。

解：根据已知条件，三相短路时，有$I_K^{(3)}=I_{K1}^{(3)}=\frac{E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}=6\text{kA}$，得

$$E_{1\Sigma}=6Z_{1\Sigma}\tag{1-5}$$

两相短路时，有$I_K^{(2)}=\sqrt{3}I_{K1}^{(2)}=\frac{\sqrt{3}E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}}=4\sqrt{3}\text{kA}$，得

$$E_{1\Sigma}=4(Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma})\tag{1-6}$$

单相接地短路时，有$I_K^{(1)}=3I_{K1}^{(1)}=\frac{3E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{0\Sigma}}=9\text{kA}$，得

$$E_{1\Sigma}=3(Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{0\Sigma})\tag{1-7}$$

由式（1－5）～式（1－7）可得

$$Z_{1\Sigma}=\frac{1}{6}E_{1\Sigma},Z_{2\Sigma}=\frac{1}{12}E_{1\Sigma},Z_{0\Sigma}=\frac{1}{12}E_{1\Sigma}$$

则当两相接地短路时有

$$I_{\mathrm{K}}^{(2,0)}=\sqrt{3}\times\sqrt{1-\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})^2}}\times\frac{E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}/\!/Z_{0\Sigma}}=7.2(\mathrm{kA})$$

例 1－7　已知图 1－17 所示的变压器星形侧 B、C 相短路时的 $\dot{I}_{\mathrm{K}}$。试以 $\dot{I}_{\mathrm{K}}$ 为参考相量绘出三角形侧线路上的三相电流相量：① 用对称分量法；② 用相量分析法。

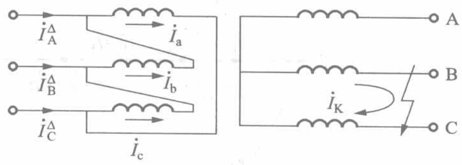


图 1－17　例 1－7 题图

［**解题分析**］用对称分量法进行分析时，需要注意对称分量经变压器后的相位变化，分为两种情况：

（1）对于接线组别为 Yy12，中性点接地或不接地的变压器，两侧的正序和负序电流、电压分量在数值上大小不同，但相位相同。

（2）对于接线组别为 YNd11 或 Yd11 的变压器，两侧的电流、电压不仅大小有变化，而且相位也有变化，变压器可看作“复变比”。需要强调的是，正序分量和负序分量的复变比不同。

如：对于 YNd11 的变压器，当 YN 侧故障时，利用 YN 侧的 $\dot{U}_{\mathrm{A1}}^{\mathrm{Y}}$、$\dot{U}_{\mathrm{A2}}^{\mathrm{Y}}$、$\dot{I}_{\mathrm{A1}}^{\mathrm{Y}}$、$\dot{I}_{\mathrm{A2}}^{\mathrm{Y}}$ 可求出 d 侧的 $\dot{U}_{\mathrm{A1}}^{\Delta}$、$\dot{U}_{\mathrm{A2}}^{\Delta}$、$\dot{I}_{\mathrm{A1}}^{\Delta}$、$\dot{I}_{\mathrm{A2}}^{\Delta}$。具体公式为

$$\dot{U}_{\mathrm{A1}}^{\Delta}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{A1}}^{\mathrm{Y}}}{\dot{K}_1}=\frac{1}{k}\mathrm{e}^{\mathrm{j}30^\circ}\dot{U}_{\mathrm{A1}}^{\mathrm{Y}},\quad \dot{U}_{\mathrm{A2}}^{\Delta}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{A2}}^{\mathrm{Y}}}{\dot{K}_2}=\frac{1}{k}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}30^\circ}\dot{U}_{\mathrm{A2}}^{\mathrm{Y}};\quad \dot{I}_{\mathrm{A1}}^{\Delta}=k\mathrm{e}^{\mathrm{j}30^\circ}\dot{I}_{\mathrm{A1}}^{\mathrm{Y}},\quad \dot{I}_{\mathrm{A2}}^{\Delta}=k\mathrm{e}^{-\mathrm{j}30^\circ}\dot{I}_{\mathrm{A2}}^{\mathrm{Y}}。$$

式中　k——变压器的变比。

变压器的“复变比”：正序为 $\dot{K}_1=k\mathrm{e}^{\mathrm{j}30^\circ}$，负序为 $\dot{K}_2=k\mathrm{e}^{-\mathrm{j}30^\circ}$。

于是可得出结论：

（1）由 YN→d，正序分量逆时针旋转 30°，负序分量顺时针旋转 30°；d 侧无零序分量。

（2）由 d→YN，正序分量顺时针旋转 30°，负序分量逆时针旋转 30°；d 侧无零序分量，YN 侧也无零序分量。

解：（1）用对称分量法。由已知可得

$\dot{I}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{Y}}=0$，$\dot{I}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{Y}}=\dot{I}_{\mathrm{K}}$，$\dot{I}_{\mathrm{C}}^{\mathrm{Y}}=-\dot{I}_{\mathrm{K}}$，则根据对称分量法有

$$\dot{I}_{\mathrm{A1}}^{\mathrm{Y}}=\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{3}\dot{I}_{\mathrm{K}},\quad \dot{I}_{\mathrm{A2}}^{\mathrm{Y}}=-\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{3}\dot{I}_{\mathrm{K}},\quad \dot{I}_{\mathrm{A0}}^{\mathrm{Y}}=0。$$

$$\dot{I}_{\mathrm{A1}}^{\Delta}=\frac{\sqrt{3}}{3}k\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}\dot{I}_{\mathrm{K}},\quad \dot{I}_{\mathrm{A2}}^{\Delta}=\frac{\sqrt{3}}{3}k\mathrm{e}^{-\mathrm{j}120^\circ}\dot{I}_{\mathrm{K}},\quad \dot{I}_{\mathrm{A0}}^{\Delta}=0，则$$

$$\dot{I}_{\mathrm{A}}^{\Delta}=-\frac{\sqrt{3}}{3}k\dot{I}_{\mathrm{K}},\quad \dot{I}_{\mathrm{B}}^{\Delta}=\frac{2\sqrt{3}}{3}k\dot{I}_{\mathrm{K}},\quad \dot{I}_{\mathrm{C}}^{\Delta}=-\frac{\sqrt{3}}{3}k\dot{I}_{\mathrm{K}}。$$

（2）用相量分析法。由已知可得

$\dot{I}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{Y}}=0$，$\dot{I}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{Y}}=\dot{I}_{\mathrm{K}}$，$\dot{I}_{\mathrm{C}}^{\mathrm{Y}}=-\dot{I}_{\mathrm{K}}$，则

$$\dot{I}_{\mathrm{a}}=k\dot{I}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{Y}}=0,\quad \dot{I}_{\mathrm{b}}=\frac{\sqrt{3}}{3}k\dot{I}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{Y}}=\frac{\sqrt{3}}{3}k\dot{I}_{\mathrm{K}},\quad \dot{I}_{\mathrm{c}}=-\frac{\sqrt{3}}{3}k\dot{I}_{\mathrm{K}}$$