

TM714.3
1944

电力新技术丛书

无功补偿的矢量控制

孙树勤 编著

中国电力出版社

前 言

高质量的输电和供电系统，均需要实时的无功补偿，以保证传输和供用电的电能质量。尤其是电力电子技术和计算机技术的迅速发展，使矢量变换控制的静止无功补偿器（SVC）和有源电力滤波器（APF）也得以开发和发展。作者在工作中，感到电工技术人员需要有一本既有理论依据又适于工程应用的小册子，专门介绍无功补偿矢量控制的基本概念和构成的技术特点以及典型装置的应用实例，为电力工程人员提供参考。

本书编写和叙述的特点是由特殊到一般。许多重要的概念，常在极为简单的实例的物理描述中引入。因为一般仅存在于特殊之中，特殊的实例常是很重要的，由它能说明一些重要的概念和工程技巧，因此在本书中，常常通过阐述一个简单的特殊例题，使读者可能由此深入地理解和掌握新的概念和技巧。在叙述上，注重物理概念，将电流和电压与电机的磁通势和磁链相联系，通过电磁现象表述变换式的物理意义，通过功率守恒来表述变换中的数量关系。

首先将矢量变换的方法和公式，从物理解释、几何表述和代数分析等三个方面分三章来叙述。如果读者能将它与熟悉的知识和现象联系起来，则不仅能从这些知识中得到启示，并能对矢量变换有较好的理解和记忆。这样可使矢量变换成为一个简易的方法，而且比人们预料的更为巧妙和有用。因为对一个数学问题的充分理解，需要清楚它的物理解释，这是本书第1章编写的目的。为能将矢量变换关系式的参数全

部列出来，还需要有清晰的几何图像，特别是在第 2 章中对“扇合矢量”的几何表述，对处理矢量变换是非常有用的。有关扇合矢量的物理解释，编写于附录 C 中供查阅。第 3 章用线性代数理论对矢量变换的论证，使我们能利用数学来加深对矢量变换的理解。用数学语言来表述矢量变换的假设前提，从而可以了解到矢量变换所作简化和假定带来的好处以及应用时可能出现的错误。

第 4 章介绍无功补偿的矢量变换控制。首先需提出以负荷的哪个变动量作为控制变量，然后采取补偿措施。负荷无功补偿的对象是复杂的，它涉及电压和频率波动、谐波、闪变和三相不平衡等诸多因素。目前以矢量变换控制的无功补偿装置的基本方法是，假定三相供电系统的电压为三相平衡的正弦波形，利用矢量变换找出表征三相电流与电压同相的基波分量，在总电流中撇除此电流分量后，将余下的电流（即基波的无功电流和各次谐波电流）作为被补偿的对象加以补偿。

第 5 章介绍矢量控制的静止无功补偿器，从无功补偿抑制电压波动、晶闸管相控电抗器以及矢量变换的控制电路等方面，阐述矢量控制的 SVC 实例。

第 6 章介绍矢量控制的静止无功发生器 (SVG)，着重介绍脉宽调制的可关断晶闸管构成的变流器，分电压型和电流型介绍两种类型变流器构成的 SVG，介绍矢量控制的微机实现和应用实例。

附录 A 阐述三相不对称和不平衡的区别之处，供对此有兴趣的读者参考。

无功补偿的矢量控制均需从三相系统的电流来控制，对电磁现象的联系理解，有助于从被补偿对象的三相电流中提

取作为无功补偿控制变量的电流分量。所以在附录 B 中介绍磁链守恒的实例，期望读者在分析暂态问题和探讨新的补偿装置时能够从中得到启迪。

此外，为方便读者阅读，本书在文前列出了主要字母符号说明，在文后列有参考文献供查看。

在编写本书时得到唐统一教授的热心指导和鼓励，唐教授并对书稿进行了仔细推敲审阅且提出了很宝贵的意见。张宝霖教授对于电路的矢量变换和张量分析给予作者诚挚的帮助并作深入的探讨。林海雪教授级高工与作者多年合作并给予支持，主编王平洋教授和周孝信院士以及中国电力出版社电编室的积极支持使本书得以完成，在此一并表示衷心感谢。限于水平，书中如有错误和欠妥之处，请给予指正，来信请寄至清华大学电机系（邮政编码：100084）。

编著者谨识

1997 年 9 月

目 录

《电力新技术丛书》出版说明

前言

主要字母符号说明

1. 矢量变换的物理解释	1
1.1 斯考特接法与 $\alpha\beta$ 变换	1
1.2 对称分量法	5
1.3 dq 变换的物理解释	12
2. 矢量变换的几何表述	16
2.1 旋转矢量	16
2.2 扇合矢量	17
2.3 矢量空间的基本概念	27
2.4 瞬时功率的矢量表述	31
3. 矢量变换的代数分析	34
3.1 矢量变换的矩阵表示	34
3.2 方矩阵的特征值	43
3.3 方矩阵的对角化	47
3.4 平衡矩阵的对角化	51
3.5 旋转对称矩阵的对角化	57
4. 无功补偿的矢量控制	65
4.1 相量识别方法	65
4.2 对称分量法控制	72
4.3 dq 矢量变换控制	73

4.4	pq 分解法控制	75
4.5	瞬时无功电流的控制	79
5.	矢量控制的静止无功补偿器	83
5.1	无功补偿抑制电压波动	83
5.2	晶闸管相控电抗器 (TCR)	86
5.3	矢量控制的 SVC 实例	90
5.4	无功补偿器的闭环控制	93
5.5	无功补偿器的响应时间	94
6.	矢量控制的静止无功发生器	96
6.1	概述	96
6.2	电压型变流器的主电路	98
6.3	电流型变流器的主电路	100
6.4	脉宽调制的控制原理	102
6.5	矢量控制的微机实现	103
6.6	矢量控制的 APF 实例	106
附录 A	不对称和不平衡	110
附录 B	磁链守恒的实例	113
附录 C	扇合矢量的物理解释	116
参考文献	119

1. 矢量变换的物理解释

1.1 斯考特接法与 $\alpha\beta$ 变换

现以两个单相变压器构成 abc 三相与 $\alpha\beta$ 两相互相变换的斯考特 (Scott) 变压器接法作为实例, 如图 1.1 所示, 对 $\alpha\beta$ 变换的物理意义给予解释。

为此, 将主变压器 T1 的一次绕组接至 b 和 c 相的两端点, 将副变压器 T2 的一次绕组两端分别接至 a 相端点和主变压器一次绕组的中心抽头 D 端。在一次侧三相电压平衡的情况下, 为使主、副两变压器二次侧 α 和 β 两相的电压大小相等, 如果两变压器二次绕组的匝数相同,

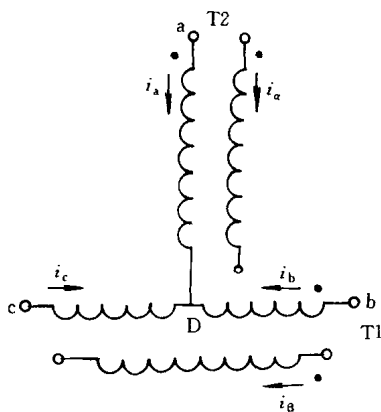


图 1.1 斯考特变压器接法

“·”一标示一次和二次绕组的同极性端;

T1—主变压器; T2—副变压器

则主变压器一次绕组的匝数应为副变压器一次绕组匝数的 $2/\sqrt{3}$ 倍。

当三相无中线或无中线电流时

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 \quad (1.1)$$

此时三相电流相量中，仅有两个独立变量。在电压和电流三相平衡的情况下，经斯考特接法的变压器变换成 $\alpha\beta$ 两相电流或电压，其相量图如图 1.2 (a) 所示，图中在主、副变压器的二次侧负荷电流相量 \dot{I}_α 和 \dot{I}_β 的方均根值相等，并且 \dot{I}_β 滞后于 \dot{I}_α 90° 电角度。设计主、副变压器一次侧绕组的匝数比为 $2:\sqrt{3}$ ，当三相平衡时一次侧主变压器绕组中电流的方均根值便与副变压器一次侧绕组电流的方均根值相等。设三相电流的取向为流向变压器，并且副变压器的一次侧 a 相电流是仅由二次侧电流 \dot{I}_α 引起的电流，即设 $\dot{I}_a \triangleq \dot{I}_\alpha$ ，则在 b 相和 c 相由 \dot{I}_α 引起的电流分量均为 $-\frac{1}{2}\dot{I}_\alpha$ ，在 b 相和 c 相由 \dot{I}_β 引起的电流分量分别为 $\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{I}_\beta$ 和 $-\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{I}_\beta$ 。于是可得一次侧的三相电流的方均根值相等， \dot{I}_b 滞后于 \dot{I}_a 120° ， \dot{I}_c 超前于 \dot{I}_a 120° ，即反映到变压器一次侧的三相电流是平衡的。两相电流变换为三相电流的关系式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_b &= -\frac{1}{2}\dot{I}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{I}_\beta \\ \dot{I}_c &= -\frac{1}{2}\dot{I}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{I}_\beta \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

由式 (1.2) 中的三个式子相加可得式 (1.1)，即此时三相电流仅有两个为独立变量。由式 (1.2) 中后二式相减可得 $\dot{I}_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_b - \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_c$ 。如果按照惯例在 \dot{I}_α 的表示式中还

要求含有 \dot{I}_b 和 \dot{I}_c 时，则可将式 (1.2) 的第一式与式 (1.1) 结合写成 $\dot{I}_\alpha = \frac{2}{3}\dot{I}_a - \frac{1}{3}\dot{I}_b - \frac{1}{3}\dot{I}_c$ 。于是三相电流变换为两相电流的关系式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_\alpha &= \frac{2}{3}\dot{I}_a - \frac{1}{3}\dot{I}_b - \frac{1}{3}\dot{I}_c \\ \dot{I}_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_b - \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_c \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

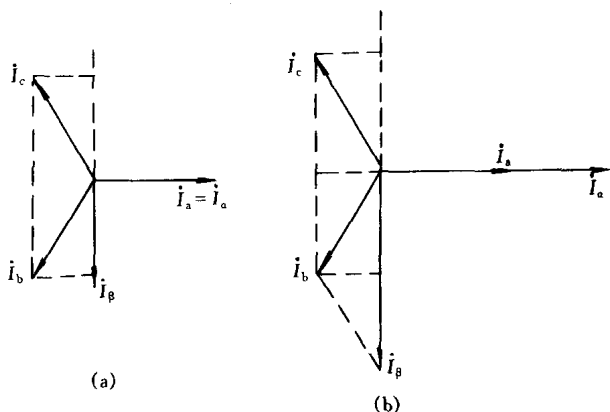


图 1.2 $\alpha\beta$ 变换电流相量图

(a) $\alpha\beta$ 变换相量图；(b) 标准 $\alpha\beta$ 变换相量图

应当指出，在斯考特接法的情况下选取 α 相与 a 相两者同相，这使变换式简化并且已成惯例。在许多的文献中也都选择 α 相与 a 相重合，这样，变换式的形式一致，便于应用。

此外，为使三相和两相的变换功率守恒（即三相功率之和等于两相功率之和），保持总功率不变，常在功率变换关系式中将三相总功率除以 3、将两相总功率除以 2，使其单位化等效成单相（单位化又称归一化）。因此对于电流和电压，在

等效成单相的单位化时，需将两相电流和电压均除以 $\sqrt{2}$ ，将三相电流和电压均除以 $\sqrt{3}$ ，便可得到标准变换式。

据此，将式(1.2)的右端乘以 $\sqrt{\frac{2}{3}}$ ，便可得到两相电流变换为三相电流的标准变换式，即

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b &= -\frac{1}{\sqrt{6}} \dot{I}_a + \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{I}_\beta \\ \dot{I}_c &= -\frac{1}{\sqrt{6}} \dot{I}_a - \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{I}_\beta \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

将式(1.3)右端乘以 $\sqrt{\frac{3}{2}}$ ，便可得到三相电流变换为两相电流的标准变换为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{I}_a - \frac{1}{\sqrt{6}} \dot{I}_b - \frac{1}{\sqrt{6}} \dot{I}_c \\ \dot{I}_\beta &= \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{I}_b - \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{I}_c \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

在式(1.2)和式(1.4)中 I_a 分别等于 I_a 和 $\sqrt{\frac{2}{3}} I_a$ ，如果 I_a 以A为单位，则在式(1.2)中 I_a 也以A为单位，但在式(1.4)中 I_a 则应以 $\sqrt{\frac{3}{2}} A$ 为单位，而在两式中的 I_a 均不需要标出单位，因为不论采用式(1.2)或式(1.4)进行变换，最终都要变换回三相电流 I_a 等量。不难看出，采用两种变换式最终所得到的，以A为单位 I_a 等的数值是相同的，这样，在变换过程中便不需要为标出不同的单位而劳神。

与标准 $\alpha\beta$ 变换相应的相量图，如图 1.2 (b) 所示。

从斯考特接法变压器的一次侧和二次侧电流的变换关系，可以对 $\alpha\beta$ 变换关系式赋予如下的启示。变压器总是按对称和平衡而设计的，但其运行时的电流则可能是不平衡的。这时变压器二次和一次绕组间的电流，仍按斯考特接法的变压器所设计的电磁联系进行变换。 $\alpha\beta$ 两相与 abc 三相的变换关系式也是按正弦和平衡的电流关系而建立的。但在应用时的电流则可能是三相不平衡的，这时 $\alpha\beta$ 两相和 abc 三相之间的电流，可仍按所建立的 $\alpha\beta$ 变换关系式进行变换。当两相电流不平衡时， \dot{I}_α 和 \dot{I}_β 不仅大小不同，而且其相位差也一定是 90° ，此时变换式未变，仍可由式 (1.4) 给出不平衡的三相电流，即 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 和 \dot{I}_c 。不仅大小可能不同，而且相邻相之间的相位差也不一定会是 120° 。

以上所述的 $\alpha\beta$ 变换关系是按正弦电流来建立的，实际应用中则采取通用的电流瞬时值的表示式予以推广，例如分析输电线的波过程等。本书在第 3 章第 3.4 节将从理论上论证 $\alpha\beta$ 变换也适用于瞬时值。

1917 年刘易斯 (W. W. Lewis) 即提出用此方法分析线对地故障。1938 年克拉克 (E. Clarke) 以 $\alpha\beta 0$ 变换命名提出改进对称分量法，次年金巴克 (W. Kimbark) 也发表三相系统的两相坐标的分析方法。至今 $\alpha\beta 0$ 变换在电工技术中仍得到广泛的应用。

1.2 对称分量法

分析三相电路，当其电路参数三相线性对称、但其运行

状态却是三相不平衡时，常采用对称分量法。一般是不平衡三相交流电源作用于平衡的三相负荷，或者在故障点的局部三相电路不对称，而其余电路参数均为三相对称。在故障的情况下，可设法将故障点的局部电路看成等效的不平衡三相电源的作用（见 1.2.2）。不论哪种不平衡三相电源的作用，都归结为其余对称三相电路与外部不平衡三相电路连接，并称此连接关系为边界条件。由对称分量法的变换公式，将给定三相不平衡的电流和电压的边界条件，变换成对称分量的电流和电压关系式。其余三相对称电路变换成正序、负序和零序三个序网，根据变换后的边界条件连接成复合序网。求解复合序网得到各序的电流和电压的各分量后，即可根据叠加原理由反变换式得出三相不平衡的电流和电压。为体现上述一般分析的方法和步骤，以下先介绍对称分量法的变换关系式，再以异步电动机一相断线故障构成单相运行的实例，介绍它的应用步骤。

1.2.1 变换关系式

任何不平衡的三相电流相量，均可由三组对称分量表示。对称分量的相量如图 1.3 所示。若令

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.6)$$

则有

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \dot{a} \\ a^3 &= 1 \\ 1 + a + a^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

式中 \dot{a} —— a 的共轭值。

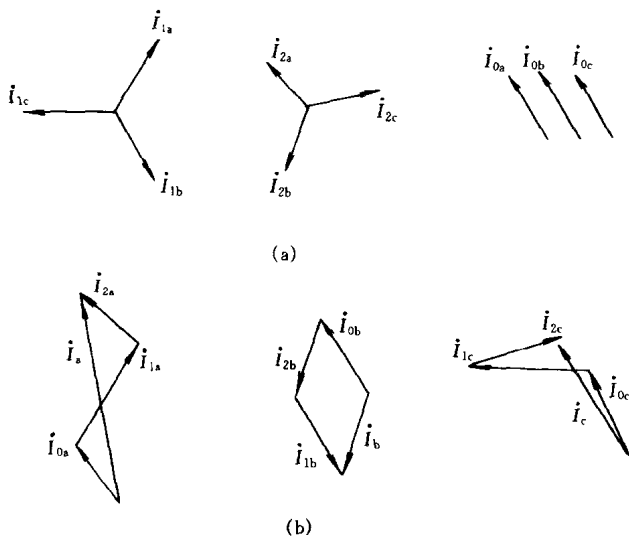


图 1.3 对称分量的相量图

(a) 正序、负序和零序三组对称分量；(b) 由对称分量构成三相电流相量

图 1.3 (a) 给出三相对称分量，即正序分量： $\dot{I}_{1a} = \dot{I}_1$ ， $\dot{I}_{1b} = a^2 \dot{I}_1$ ， $\dot{I}_{1c} = a \dot{I}_1$ ；负序分量： $\dot{I}_{2a} = \dot{I}_2$ ， $\dot{I}_{2b} = a \dot{I}_2$ ， $\dot{I}_{2c} = a^2 \dot{I}_2$ ；零序分量： $\dot{I}_{0a} = \dot{I}_{0b} = \dot{I}_{0c} = \dot{I}_0$ 。

图 1.3 (b) 给出由对称分量叠加而成的三相电流相量，即

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_0 + a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

由上列联立方程可以解出

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \\ \dot{I}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

对称分量法在建立变换关系式时，将三个对称分量同等对待。如同 $\alpha\beta$ 变换一样，对于三相和三个对称分量的电流和电压也均除以 $\sqrt{3}$ ，使其单位化等效为单相。于是式(1.8)和式(1.9)分别成为式(1.10)和式(1.11)的标准变换式，即

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2) \\ \dot{I}_b &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\dot{I}_0 + a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2) \\ \dot{I}_c &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\dot{I}_0 + a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2) \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \\ \dot{I}_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

1.2.2 异步电动机单相运行的故障分析

三相四线制负荷，一相断线成为两相负荷；三相三线制负荷，一相断线则成为单相负荷。三相异步电动机在运行中出现一相断线故障，则成为单相运行。作为对称分量法应用实例，首先将一相断线的故障点局部网络框划出来，如图1.4

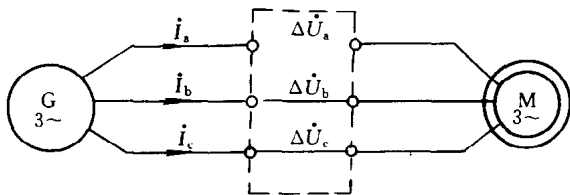


图 1.4 电动机单相运行的故障电路

中虚线框图所示，虚线框图以外为对称的原网络的其余对称三相电路，将框图以内的故障点局部网络看作为与三相对称电路相连接的外部电路，其相连接处的电流和电压的关系即为对称三相电路的边界条件。在故障点局部三相不对称的网络中，a 相为开路线段， $\dot{I}_a = 0$ ；b 相为短路线段，无电压降， $\Delta \dot{U}_b = 0$ ；c 相也为短路线段， $\Delta \dot{U}_c = 0$ 。原网络在断线故障点的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= 0 \\ \Delta \dot{U}_b &= 0 \\ \Delta \dot{U}_c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

因为电动机负荷无中线，故有

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 \quad (1.13)$$

设三相电源相电压的方均根值为 U ，则三个相电压相量为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= U \\ \dot{U}_b &= a^2 U \\ \dot{U}_c &= a U \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

电源电压的对称分量相量，将式 (1.14) 代入与电流变换类似的关系式 (1.11) 可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_0 &= 0 \\ \dot{U}_1 &= \sqrt{3}U \\ \dot{U}_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

由式 (1.13) 代入式 (1.11)，可得 $\dot{I}_0=0$ ，即无零序网络和零序电流。将式 (1.12) 中的第 1 式代入式 (1.8) 中的第 1 式，可得 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$ ，即

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \quad (1.16)$$

由式 (1.10) 和式 (1.12) 可得

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{3}\Delta\dot{U}_b &= a\Delta\dot{U}_1 + a^2\Delta\dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_0 = 0 \\ \sqrt{3}\Delta\dot{U}_c &= a^2\Delta\dot{U}_1 + a\Delta\dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

将式 (1.17) 中的二式相减，则有 $a(\Delta\dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_2) = a^2(\Delta\dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_2)$ 。因 $a \neq 0$ ，于是有

$$\Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2 \quad (1.18)$$

式 (1.16) 和式 (1.18) 为故障点构成的边界条件。

设异步电动机正序和负序的漏抗均为 X ，设代表转子轴功率或转矩的有功分量以电阻 R 表示，则折合到定子侧在正序网络为 $\frac{R}{s}$ (s 为转差率)；在负序网络为 $\frac{R}{2}$ (负序基波旋转磁场相对转子以 2 倍同步转速逆序旋转)。

在如图 1.5 所示的正序和负序网络中， $\dot{U}_1 = \sqrt{3}U$ ， $\dot{U}_2 = 0$ 。根据 $\Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$ 的边界条件，将正序和

负序两个序网连接在一起,如图 1.5 中的虚线连接线所示。图 1.6 给出连接后的复合序网。

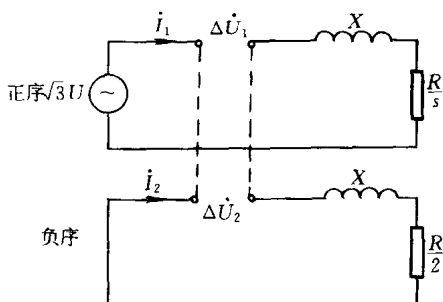


图 1.5 正序和负序网络

在电动机空载或轻载运行时,转差率很小, $2X$

$\ll \frac{R}{s}$, $\frac{R}{2} \ll \frac{R}{s}$, 则 $\dot{I}_1 =$

$$\sqrt{3} U \Big/ \frac{R}{s} = \sqrt{3} \frac{sU}{R} =$$

$-\dot{I}_2$ 。

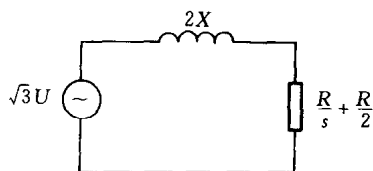


图 1.6 复合序网

由式 (1.10) 可以得出单相运行时的三相电流为

$$\dot{I}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = 0$$

$$\dot{I}_b = \frac{1}{\sqrt{3}} (a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} (a - a^2)\dot{I}_1 = j\dot{I}_1 = j\sqrt{3} \frac{sU}{R}$$

$$\dot{I}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} (a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2)$$