

DIANLI XITONG BUDUICHEN JISUAN

电力系统 不对称计算

■ 杨耿杰 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力系统不对称计算

杨耿杰 著

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是关于电力系统不对称计算的专著,对电力系统不对称分析计算的基本原理、算法及其实现方法进行了比较系统的阐述。

全书共分七章,主要内容包括电力系统不对称运行概述、简单不对称电路计算、电力系统网络方程及其应用、电力网络导纳矩阵的形成方法、电力系统不对称潮流计算、电力系统故障计算和稳定计算、同步发电机不对称计算,为便于读者学习,书中附有一些算例。

本书可供从事电力系统运行、设计、试验、科研等工作的科技人员阅读,也可作为电力系统及其自动化及相关专业高年级学生、研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统不对称计算/杨耿杰著. —北京:中国电力出版社, 2008

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7398 - 0

I. 电… II. 杨… III. 电力系统计算 IV. TM744

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 091843 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

*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷
889 毫米×1194 毫米 16 开本 10.75 印张 296 千字
印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

电力系统由发电机、变压器、输电线路和电力用户等组成。对于组成电力系统的设备，由于制造、工艺、施工等因素的影响，要做到各相参数完全相等是不可能的，各相负荷也不可能完全一致，因此严格地说，电力系统是处于不对称情况下运行。由于电力系统不对称程度较小和分析工具的限制，以往都将电力系统正常运行方式当作对称情况分析。随着电力系统的不断发展，局部不对称的情况明显突出，且对作为电能质量的指标之一的“三相电压允许不平衡”的要求越来越高，将电力系统当作不对称情况进行分析很有必要。而且目前计算工具发达，对电力系统进行不对称分析成为可能。这样可以为电力系统设计和运行提供更加全面、可靠的信息，可以进一步提高电力系统安全、优质、经济运行水平。

电力系统除了正常运行出现的不对称情况外，非正常运行方式（即发生故障）时，也会出现不对称情况，例如不对称短路和不对称断线。现有的电力系统故障分析中，一般认为非故障部分是对称的，只有故障部分才出现不对称，这样的处理方法是近似的，若在故障分析中能计及非故障部分出现的不对称情况，则其计算结果会更加精确，更切合实际。

电力系统不对称运行可分为稳态运行和暂态运行。稳态运行系指系统正常潮流分布计算；准稳态分析系指电力系统故障计算；暂态运行分析系指电力系统暂态稳定和静态稳定计算。不论哪一种计算，对电力网络的处理和分析是关键。

本书基于以上思路展开讨论，比较系统地阐述了电力系统不对称分析计算的基本原理、算法及其实现方法。

在本书的撰写过程中，导师陈亚民教授倾注了大量心血，对选题、内容、体系给予了精心的指导，并审阅了初稿。值此书稿完成之际，谨向导师表示深深的谢意和崇高的敬意。初稿完成后，蒙湖南大学李欣然教授仔细审阅，提出了不少宝贵意见。在此表示衷心的感谢。福州大学电气工程与自动化学院电力工程系郭谋发老师、洪翠老师、张嫣老师和硕士研究生郭冬阳、高伟、张书芳同学认真细致地承担了本书的插图绘制、文字编校和算例演算工作，他们付出的劳动加快了书稿的完成，在此深表谢意。作者还对书中所列参考文献的作者表示感谢。

限于作者水平，书中不妥和错误之处在所难免，诚望读者给予批评和指正。

作者
2008年5月

目 录

前 言	1
第一章 电力系统不对称运行概述	1
第一节 电力系统不对称运行的基本概念	1
第二节 不对称运行分析方法	3
第三节 产生不对称的原因	9
第四节 电网不对称运行的影响	10
第二章 简单不对称电路计算	14
第一节 单电源简单不对称阻抗电路计算	14
第二节 电动机负荷	25
第三节 双电源简单电路	30
第四节 牵引变压器不对称负荷计算	33
第三章 电力系统网络方程	35
第一节 单相电力网络方程	35
第二节 三相网络方程	38
第三节 三序网络方程	40
第四节 电力网络方程的应用	44
第四章 电力网络导纳矩阵	49
第一节 输电线路电气参数的计算	49
第二节 用集中参数表示的输电线路节点导纳矩阵	55
第三节 用分布参数表示的输电线路节点导纳矩阵	59
第四节 变压器参数和等值电路	64
第五节 V_V 接法三相变压器的节点导纳矩阵	67
第六节 三相变压器的节点导纳矩阵	71
第七节 不对称负荷的节点导纳矩阵	82
第八节 非全相处的节点导纳矩阵	85
第五章 电力系统不对称潮流计算	90
第一节 单相潮流计算原理	91
第二节 相量法	96

第三节	序量法	103
第四节	算例	109
第六章	电力系统故障计算和稳定计算	116
第一节	电力系统故障计算基本原理	116
第二节	修改导纳矩阵的计算	118
第三节	电力系统暂态稳定计算	131
第七章	同步发电机不对称计算	136
第一节	同步发电机稳态不对称运行计算	136
第二节	同步发电机电磁暂态过程方程	137
第三节	同步发电机突然三相短路分析	143
第四节	两相短路分析	149
第五节	单相短路分析	152
第六节	两相接地短路分析	155
参考文献		163

第一章

电力系统不对称运行概述

第一节 电力系统不对称运行的基本概念

现代电力系统电能形态普遍采用三相正弦交流电,三相通常称为 a、b、c 相。当三相电压(电流)的幅值相等,相位互差 120° ,且 b 相滞后 a 相 120° ,c 相滞后 b 相 120° 时,称为对称情况,其三相电压(电流)也称为正序分量。它们的瞬时值如式(1-1)和式(1-2)所示,复数表达式如式(1-3)和式(1-4)所示。其电压波形图如图 1-1(a)所示,相量图如图 1-1(b)所示。

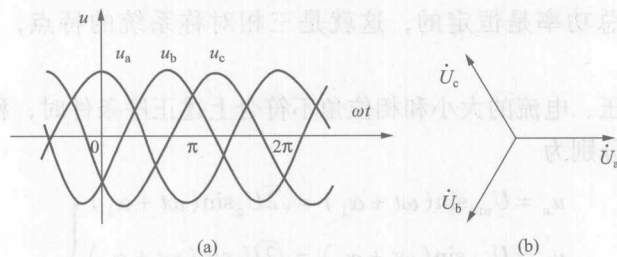


图 1-1 对称三相电压波形图和相量图

(a) 波形图; (b) 相量图

$$\left. \begin{aligned} u_a &= U_m \sin(\omega t + \alpha) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha) \\ u_b &= U_m \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ) \\ u_c &= U_m \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \\ i_b &= I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 120^\circ) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 120^\circ) \\ i_c &= I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi + 120^\circ) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \alpha - \varphi + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= U e^{j\alpha} \\ \dot{U}_b &= U e^{j(\alpha - 120^\circ)} \\ \dot{U}_c &= U e^{j(\alpha + 120^\circ)} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= I e^{j(\alpha - \varphi)} \\ \dot{I}_b &= I e^{j(\alpha - \varphi - 120^\circ)} \\ \dot{I}_c &= I e^{j(\alpha - \varphi + 120^\circ)} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 U_m ——电压幅值；

I_m ——电流幅值；

U ——电压有效值，为 $U_m/\sqrt{2}$ ；

I ——电流有效值，为 $I_m/\sqrt{2}$ ；

ω ——角频率；

t ——时间；

α ——电压起始相角；

φ ——功率因数角。

由式 (1-1) 和式 (1-2) 可得三相系统各相瞬时功率为

$$\left. \begin{aligned} p_a &= u_a i_a = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + 2\alpha - \varphi) \\ p_b &= u_b i_b = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + 2\alpha - \varphi + 120^\circ) \\ p_c &= u_c i_c = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + 2\alpha - \varphi - 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

三相总功率为

$$p = p_a + p_b + p_c = 3UI \cos \varphi \quad (1-6)$$

由式 (1-5) 和式 (1-6) 可知，单相功率是随时间变化的，在恒定功率 $UI \cos \varphi$ 基础上以两倍角频率速度脉动，而三相总功率是恒定的，这就是三相对称系统的特点，可保证同步发电机平稳运行。

当三相供电系统的电压、电流的大小和相位角不符合上述正序条件时，称为不对称状态，其三相电压和电流瞬时值表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} u_a &= U_{am} \sin(\omega t + \alpha_1) = \sqrt{2} U_a \sin(\omega t + \alpha_1) \\ u_b &= U_{bm} \sin(\omega t + \alpha_2) = \sqrt{2} U_b \sin(\omega t + \alpha_2) \\ u_c &= U_{cm} \sin(\omega t + \alpha_3) = \sqrt{2} U_c \sin(\omega t + \alpha_3) \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

和

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_{am} \sin(\omega t + \alpha_1 - \varphi_1) = \sqrt{2} I_a \sin(\omega t + \alpha_1 - \varphi_1) \\ i_b &= I_{bm} \sin(\omega t + \alpha_2 - \varphi_2) = \sqrt{2} I_b \sin(\omega t + \alpha_2 - \varphi_2) \\ i_c &= I_{cm} \sin(\omega t + \alpha_3 - \varphi_3) = \sqrt{2} I_c \sin(\omega t + \alpha_3 - \varphi_3) \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 U_{am} 、 U_{bm} 、 U_{cm} ——a、b、c 相电压的幅值；

I_{am} 、 I_{bm} 、 I_{cm} ——a、b、c 相电流的幅值；

U_a 、 U_b 、 U_c ——a、b、c 相电压有效值， $U_a = U_{am}/\sqrt{2}$ ， $U_b = U_{bm}/\sqrt{2}$ ， $U_c = U_{cm}/\sqrt{2}$ ；

I_a 、 I_b 、 I_c ——a、b、c 相电流有效值， $I_a = I_{am}/\sqrt{2}$ ， $I_b = I_{bm}/\sqrt{2}$ ， $I_c = I_{cm}/\sqrt{2}$ ；

α_1 、 α_2 、 α_3 ——a、b、c 相电压的起始相角；

φ_1 、 φ_2 、 φ_3 ——a、b、c 相功率因数角。

三相电压和电流的复数表达式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= U_a e^{j\alpha_1} \\ \dot{U}_b &= U_b e^{j\alpha_2} \\ \dot{U}_c &= U_c e^{j\alpha_3} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

和

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= I_a e^{j(\alpha_1 - \varphi_1)} \\ \dot{I}_b &= I_b e^{j(\alpha_2 - \varphi_2)} \\ \dot{I}_c &= I_c e^{j(\alpha_3 - \varphi_3)} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

不对称三相电压相量图如图 1-2 所示。

由式 (1-7) 和式 (1-8) 可得不对称三相系统各相瞬时功率为

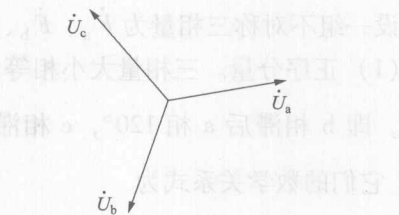


图 1-2 不对称三相电压相量图

$$\left. \begin{aligned} p_a &= u_a i_a = U_a I_a \cos \varphi_1 - U_a I_a \cos(2\omega t + 2\alpha_1 - \varphi_1) \\ p_b &= u_b i_b = U_b I_b \cos \varphi_2 - U_b I_b \cos(2\omega t + 2\alpha_2 - \varphi_2) \\ p_c &= u_c i_c = U_c I_c \cos \varphi_3 - U_c I_c \cos(2\omega t + 2\alpha_3 - \varphi_3) \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

不对称三相系统总功率为

$$\begin{aligned} p &= p_a + p_b + p_c = U_a I_a \cos \varphi_1 + U_b I_b \cos \varphi_2 + U_c I_c \cos \varphi_3 - U_a I_a \cos(2\omega t + 2\alpha_1 - \varphi_1) \\ &\quad - U_b I_b \cos(2\omega t + 2\alpha_2 - \varphi_2) - U_c I_c \cos(2\omega t + 2\alpha_3 - \varphi_3) \end{aligned} \quad (1-12)$$

由此可见不对称三相系统不论单相功率, 还是三相总功率都是随时间变化的, 在某一恒定功率上以两倍角频率速度脉动。因此, 电力系统不对称运行时, 会增加电机的振动。

电力系统由发电机、变压器、输电线路和电力用户等组成。现代电力系统中的电源都是三相同步发电机, 按照当前的制造技术和工艺水平, 完全能做到三相同步发电机产生的三相电动势是对称的。要使电力系统处于对称情况下运行, 还必须做到三相变压器、输电线路等元件中各相参数完全相等, 三相电力用户中各相负荷完全一致, 实际上这是很难做到的。因此严格地说, 电力系统是处于不对称情况下运行的。由于电力系统不对称的程度比较小和分析工具的限制, 以前都将电力系统正常运行方式当作对称情况进行分析。随着电力系统不断发展, 局部不对称的情况明显突出, 且对作为电能质量指标之一的“三相电压允许不平衡”的要求越来越高, 将电力系统当作不对称情况进行分析是很有必要的。而且目前计算工具十分发达, 对电力系统进行不对称分析成为可能。这样可以为电力系统设计和运行提供更加全面、可靠的信息, 可以进一步提高电力系统安全、优质、经济运行水平。

电力系统除了正常运行出现的不对称情况外, 当发生非正常运行方式时, 即发生故障时, 也会出现不对称情况, 例如不对称短路和不对称断线。现有电力系统故障分析中, 一般认为非故障部分是对称的, 只有故障部分才出现不对称, 这样处理方法是近似的。若在故障分析中能计及非故障部分出现的不对称情况, 则其计算结果会更加精确, 更切合实际。

第二节 不对称运行分析方法

电力系统不对称运行可分为稳态运行和暂态运行。稳态运行分析系指系统正常潮流分布计算; 准稳态分析系指电力系统故障计算; 暂态运行分析系指电力系统暂态稳定和静态稳定计算。不论哪一种计算, 对电力网络的处理和分析是关键, 因此这里讨论的不对称分析方法也就是对电力网络的处理和分析方法, 一般分为相量法、序量法和相—序混合法。最后一种方法是前面两种方法混合而成的。相量法就是按实际三相电路进行分析, 与一般交流电路分析无大异。序量法是将三相电路进行坐标变换的一种方法, 也称为对称分量法, 这是本书着重讨论的方法。

三相系统对称分量法就是把一组具有三个不对称相量系统分解为具有不同相序的三组对称三相系统, 然后对三组对称分量及其相关的系统进行求解, 求得三组对称分量, 最后利用叠加原理得出三个不对称相量。

设一组不对称三相量为 $\dot{F}_a$ 、 $\dot{F}_b$ 、 $\dot{F}_c$ ，可分解为三组对称分量。这三组对称分量的特点是：

(1) 正序分量。三相量大小相等，相位彼此相差 120° ，其相序与系统正常对称运行方式的相序一致，即 b 相滞后 a 相 120° ，c 相滞后 b 相 120° 。设这组正序分量的三相相量分别为 $\dot{F}_{a1}$ 、 $\dot{F}_{b1}$ 、 $\dot{F}_{c1}$ ，它们的数学关系式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_{b1} &= a^2 \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{c1} &= a \dot{F}_{a1} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} a &= e^{j120^\circ} = -1/2 + j\sqrt{3}/2 \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = -1/2 - j\sqrt{3}/2 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

其相量图如图 1-3 (a) 所示。

(2) 负序分量。三相量大小相等，相位彼此相差 120° ，其相序与系统正常对称运行方式的相序相反，即 b 相超前 a 相 120° ，c 相超前 b 相 120° 。设这组负序分量的三相相量分别为 $\dot{F}_{a2}$ 、 $\dot{F}_{b2}$ 、 $\dot{F}_{c2}$ ，它们的数学关系式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_{b2} &= a \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{c2} &= a^2 \dot{F}_{a2} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

其相量图如图 1-3 (b) 所示。

(3) 零序分量。三相量大小相等，相位相同。设这组零序分量的三相相量分别为 $\dot{F}_{a0}$ 、 $\dot{F}_{b0}$ 、 $\dot{F}_{c0}$ 。它们的数学关系式为

$$\dot{F}_{a0} = \dot{F}_{b0} = \dot{F}_{c0} \quad (1-16)$$

其相量图如图 1-3 (c) 所示。

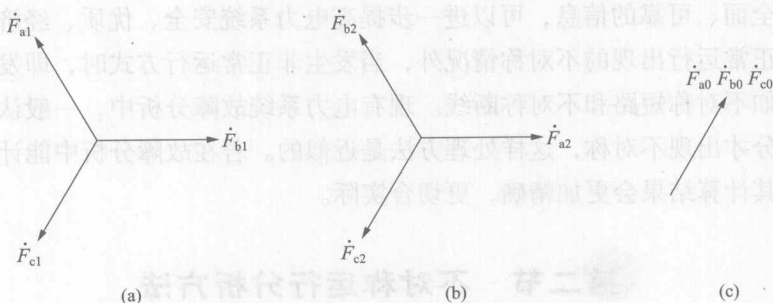


图 1-3 三相系统的对称分量相量图

(a) 正序分量；(b) 负序分量；(c) 零序分量

为了说明一组不对称三相相量可以分解成上述三组对称分量，不妨先假设一组不对称的三相相量是由上述三组对称分量叠加而成的，即

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_a &= \dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_b &= \dot{F}_{b1} + \dot{F}_{b2} + \dot{F}_{b0} \\ \dot{F}_c &= \dot{F}_{c1} + \dot{F}_{c2} + \dot{F}_{c0} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

将式 (1-13)、式 (1-15) 和式 (1-16) 代入式 (1-17) 可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_a &= \dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_b &= a^2 \dot{F}_{a1} + a \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_c &= a \dot{F}_{a1} + a^2 \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{a0} \end{pmatrix} \quad (1-19)$$

或简写成为

$$F_{abc} = TF_{120} \quad (1-20)$$

式中

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1-21)$$

称为三序量与三相量之间的变换矩阵，是一个三阶的非奇异矩阵。

式(1-19)和式(1-20)表示已知三组对称分量可以求得一组不对称三相量。若已知一组不对称三相量，要求其三组对称分量，只要将式(1-20)的两边分别左乘 T 的逆矩阵 T^{-1} ，便可得

$$F_{120} = T^{-1}F_{abc} \quad (1-22)$$

式中

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (1-23)$$

将式(1-22)展开，各对称分量表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_{a1} &= (\dot{F}_a + a\dot{F}_b + a^2\dot{F}_c)/3 \\ \dot{F}_{a2} &= (\dot{F}_a + a^2\dot{F}_b + a\dot{F}_c)/3 \\ \dot{F}_{a0} &= (\dot{F}_a + \dot{F}_b + \dot{F}_c)/3 \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

这里对称分量均以 a 相为参考相。通常用 $\dot{F}_1$ 、 $\dot{F}_2$ 、 $\dot{F}_0$ 表示 $\dot{F}_{a1}$ 、 $\dot{F}_{a2}$ 、 $\dot{F}_{a0}$ ，并分别称为正序、负序和零序分量。 F 可以表示电压、电流、磁链等。

为了说明相量法与序量法的差别，现以一条支路为例进行讨论。假设一条支路两端的三相电压差分别为 $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$ ，三相电流分别为 $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 、 $\dot{I}_c$ ，则其电压回路方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{pmatrix} \quad (1-25)$$

式中 Z_{aa} 、 Z_{bb} 、 Z_{cc} —— a 、 b 、 c 三相导线的自阻抗；

Z_{ab} 、 Z_{ac} 、 Z_{ba} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 、 Z_{cb} ——各相导线之间的互感阻抗。

一般电力系统支路的互感阻抗是互易的，即 $Z_{ab} = Z_{ba}$ ， $Z_{ac} = Z_{ca}$ ， $Z_{bc} = Z_{cb}$ ，那么式(1-25)可改写为

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{pmatrix} \quad (1-26)$$

或简写为

$$U_{abc} = Z_{abc} I_{abc} \quad (1-27)$$

式中

$$Z_{abc} = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{pmatrix} \quad (1-28)$$

称为支路三相阻抗矩阵。

若已知三相电流, 由式 (1-26) 或式 (1-27) 可求得三相电压, 因为一般支路三相阻抗矩阵是已知的。

若已知三相电压, 要求三相电流, 则将式 (1-27) 两边左乘矩阵 Z_{abc} 的逆矩阵 Z_{abc}^{-1} , 可得

$$I_{abc} = Z_{abc}^{-1} U_{abc} \quad (1-29)$$

或写成

$$I_{abc} = Y_{abc} U_{abc} \quad (1-30)$$

式中, $Y_{abc} = Z_{abc}^{-1}$, 是 Z_{abc} 矩阵的逆矩阵, 也称为支路三相导纳矩阵, 并表示为

$$Y_{abc} = \begin{pmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ab} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ac} & Y_{bc} & Y_{cc} \end{pmatrix} \quad (1-31)$$

Z_{abc} 是对称矩阵, 所以 Y_{abc} 也是对称矩阵。由 Z_{abc} 中的元素可求得 Y_{abc} 中的元素, 根据矩阵求逆原理可得

$$\left. \begin{aligned} Y_{aa} &= (Z_{bb}Z_{cc} - Z_{bc}Z_{bc})/A \\ Y_{bb} &= (Z_{aa}Z_{cc} - Z_{ac}Z_{ac})/A \\ Y_{cc} &= (Z_{aa}Z_{bb} - Z_{ab}Z_{ab})/A \\ Y_{ab} &= (Z_{ac}Z_{bc} - Z_{cc}Z_{ab})/A \\ Y_{ac} &= (Z_{ab}Z_{bc} - Z_{bb}Z_{ac})/A \\ Y_{bc} &= (Z_{ab}Z_{ac} - Z_{aa}Z_{bc})/A \end{aligned} \right\} \quad (1-32)$$

$$\text{式中} \quad A = Z_{aa}Z_{bb}Z_{cc} + 2Z_{ab}Z_{ac}Z_{bc} - Z_{aa}Z_{bc}^2 - Z_{bb}Z_{ac}^2 - Z_{cc}Z_{ab}^2 \quad (1-33)$$

由式 (1-29) 或式 (1-30) 可求得三相电流。

应用对称分量法进行分析时, 利用式 (1-20), 并代入式 (1-27) 可得

$$U_{120} = T^{-1} Z_{abc} T I_{120} \quad (1-34)$$

或写成

$$U_{120} = Z_{120} I_{120} \quad (1-35)$$

式中

$$Z_{120} = T^{-1} Z_{abc} T \quad (1-36)$$

称为支路三序阻抗矩阵, 可表示为

$$Z_{120} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{10} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{20} \\ Z_{01} & Z_{02} & Z_{00} \end{pmatrix} \quad (1-37)$$

虽然 Z_{abc} 是对称矩阵, 但 Z_{120} 一般是非对称矩阵。

将式 (1-21)、式 (1-23) 代入式 (1-36) 可得

$$\left. \begin{aligned} Z_{11} &= (Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc} - Z_{ab} - Z_{ac} - Z_{bc})/3 \\ Z_{12} &= (Z_{aa} + a^2 Z_{bb} + a Z_{cc} + 2a Z_{ab} + 2a^2 Z_{ac} + 2Z_{bc})/3 \\ Z_{10} &= (Z_{aa} + a Z_{bb} + a^2 Z_{cc} - a^2 Z_{ab} - a Z_{ac} - Z_{bc})/3 \\ Z_{21} &= (Z_{aa} + a Z_{bb} + a^2 Z_{cc} + 2a^2 Z_{ab} + 2a Z_{ac} + 2Z_{bc})/3 \\ Z_{22} &= (Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc} - Z_{ab} - Z_{ac} - Z_{bc})/3 \\ Z_{20} &= (Z_{aa} + a^2 Z_{bb} + a Z_{cc} - a Z_{ab} - a^2 Z_{ac} - Z_{bc})/3 \\ Z_{01} &= (Z_{aa} + a^2 Z_{bb} + a Z_{cc} - a Z_{ab} - a^2 Z_{ac} - Z_{bc})/3 \\ Z_{02} &= (Z_{aa} + a Z_{bb} + a^2 Z_{cc} - a^2 Z_{ab} - a Z_{ac} - Z_{bc})/3 \\ Z_{00} &= (Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc} + 2Z_{ab} + 2Z_{ac} + 2Z_{bc})/3 \end{aligned} \right\} \quad (1-38)$$

式中 Z_{11} 、 Z_{22} 、 Z_{00} ——支路正序、负序、零序阻抗;

Z_{12} 、 Z_{10} 、 Z_{21} 、 Z_{20} 、 Z_{01} 、 Z_{02} ——支路各序间的耦合阻抗。

式 (1-35) 两边分别左乘 Z_{120}^{-1} , 那么

$$I_{120} = Z_{120}^{-1} U_{120} \quad (1-39)$$

或写成

$$I_{120} = Y_{120} U_{120} \quad (1-40)$$

式中

$$Y_{120} = Z_{120}^{-1} \quad (1-41)$$

Y_{120} 是 Z_{120} 的逆矩阵, 也称为支路三序导纳矩阵。它的表达式为

$$Y_{120} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{10} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{20} \\ Y_{01} & Y_{02} & Y_{00} \end{pmatrix} \quad (1-42)$$

式中 Y_{11} 、 Y_{22} 、 Y_{00} ——支路正序、负序、零序导纳;

Y_{12} 、 Y_{10} 、 Y_{21} 、 Y_{20} 、 Y_{01} 、 Y_{02} ——支路各序之间的耦合导纳。

按矩阵求逆原理, 由式 (1-41) 可得

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} &= (Z_{22} Z_{00} - Z_{20} Z_{02})/B \\ Y_{12} &= (Z_{10} Z_{02} - Z_{00} Z_{12})/B \\ Y_{10} &= (Z_{12} Z_{20} - Z_{22} Z_{10})/B \\ Y_{21} &= (Z_{20} Z_{01} - Z_{00} Z_{21})/B \\ Y_{22} &= (Z_{11} Z_{00} - Z_{10} Z_{01})/B \\ Y_{20} &= (Z_{21} Z_{10} - Z_{11} Z_{20})/B \\ Y_{01} &= (Z_{02} Z_{21} - Z_{22} Z_{01})/B \\ Y_{02} &= (Z_{01} Z_{12} - Z_{11} Z_{02})/B \\ Y_{00} &= (Z_{11} Z_{22} - Z_{12} Z_{21})/B \end{aligned} \right\} \quad (1-43)$$

$$\text{式中 } B = Z_{11} Z_{22} Z_{00} + Z_{12} Z_{20} Z_{01} + Z_{10} Z_{21} Z_{02} - Z_{10} Z_{22} Z_{01} - Z_{11} Z_{20} Z_{02} - Z_{00} Z_{12} Z_{21} \quad (1-44)$$

若将式 (1-36) 代入式 (1-44), 可得 $B=A$, A 的表达式如式 (1-33) 所示。

用另一种方法也可以求得矩阵 Y_{120} 各元素。将式 (1-20) 代入式 (1-30), 再两边左乘 T 的逆矩阵 T^{-1} , 可得

$$Y_{120} = T^{-1} Y_{abc} T \quad (1-45)$$

将式 (1-21)、式 (1-23) 和式 (1-31) 代入式 (1-45) 可得

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} &= (Y_{aa} + Y_{bb} + Y_{cc} - Y_{ab} - Y_{ac} - Y_{bc})/3 \\ Y_{12} &= (Y_{aa} + a^2 Y_{bb} + a Y_{cc} + 2a Y_{ab} + 2a^2 Y_{ac} + 2Y_{bc})/3 \\ Y_{10} &= (Y_{aa} + a Y_{bb} + a^2 Y_{cc} - a^2 Y_{ab} - a Y_{ac} - Y_{bc})/3 \\ Y_{21} &= (Y_{aa} + a Y_{bb} + a^2 Y_{cc} + 2a^2 Y_{ab} + 2a Y_{ac} + 2Y_{bc})/3 \\ Y_{22} &= (Y_{aa} + Y_{bb} + Y_{cc} - Y_{ab} - Y_{ac} - Y_{bc})/3 \\ Y_{20} &= (Y_{aa} + a^2 Y_{bb} + a Y_{cc} - a Y_{ab} - a^2 Y_{ac} - Y_{bc})/3 \\ Y_{01} &= (Y_{aa} + a^2 Y_{bb} + a Y_{cc} - a Y_{ab} - a^2 Y_{ac} - Y_{bc})/3 \\ Y_{02} &= (Y_{aa} + a Y_{bb} + a^2 Y_{cc} - a^2 Y_{ab} - a Y_{ac} - Y_{bc})/3 \\ Y_{00} &= (Y_{aa} + Y_{bb} + Y_{cc} + 2Y_{ab} + 2Y_{ac} + 2Y_{bc})/3 \end{aligned} \right\} \quad (1-46)$$

将式 (1-38) 代入式 (1-43), 或将式 (1-32) 代入式 (1-46), 两者得出结果一样, 均为

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} &= (Z_{aa} Z_{bb} + Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} + Z_{aa} Z_{bc} + Z_{bb} Z_{ac} + Z_{cc} Z_{ab} - Z_{ab}^2 - Z_{ac}^2 - Z_{bc}^2 \\ &\quad - Z_{ab} Z_{ac} - Z_{ab} Z_{bc} - Z_{ac} Z_{bc})/3/A \\ Y_{12} &= (a Z_{aa} Z_{bb} + a^2 Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} - 2Z_{aa} Z_{bc} - 2a^2 Z_{bb} Z_{ac} - 2a Z_{cc} Z_{ab} - a Z_{ab}^2 \\ &\quad - a^2 Z_{ac}^2 - Z_{bc}^2 + 2Z_{ab} Z_{ac} + 2a^2 Z_{ab} Z_{bc} + 2a Z_{ac} Z_{bc})/3/A \\ Y_{10} &= (a^2 Z_{aa} Z_{bb} + a Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} + Z_{aa} Z_{bc} + a Z_{bb} Z_{ac} + a^2 Z_{cc} Z_{ab} - a^2 Z_{ab}^2 \\ &\quad - a Z_{ac}^2 - Z_{bc}^2 - Z_{ab} Z_{ac} - a Z_{ab} Z_{bc} - a^2 Z_{ac} Z_{bc})/3/A \\ Y_{21} &= (a^2 Z_{aa} Z_{bb} + a Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} - 2Z_{aa} Z_{bc} - 2a Z_{bb} Z_{ac} - 2a^2 Z_{cc} Z_{ab} - a^2 Z_{ab}^2 \\ &\quad - a Z_{ac}^2 - Z_{bc}^2 + 2Z_{ab} Z_{ac} + 2a Z_{ab} Z_{bc} + 2a^2 Z_{ac} Z_{bc})/3/A \\ Y_{22} &= (Z_{aa} Z_{bb} + Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} + Z_{aa} Z_{bc} + Z_{bb} Z_{ac} + Z_{cc} Z_{ab} - Z_{ab}^2 - Z_{ac}^2 - Z_{bc}^2 \\ &\quad - Z_{ab} Z_{ac} - Z_{ab} Z_{bc} - Z_{ac} Z_{bc})/3/A \\ Y_{20} &= (a Z_{aa} Z_{bb} + a^2 Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} + Z_{aa} Z_{bc} + a^2 Z_{bb} Z_{ac} + a Z_{cc} Z_{ab} - a Z_{ab}^2 \\ &\quad - a^2 Z_{ac}^2 - Z_{bc}^2 - Z_{ab} Z_{ac} - a^2 Z_{ab} Z_{bc} - a Z_{ac} Z_{bc})/3/A \\ Y_{01} &= (a Z_{aa} Z_{bb} + a^2 Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} + Z_{aa} Z_{bc} + a^2 Z_{bb} Z_{ac} + a Z_{bb} Z_{ab} - a Z_{ab}^2 \\ &\quad - a^2 Z_{ac}^2 - Z_{bc}^2 - Z_{ab} Z_{ac} - a^2 Z_{ab} Z_{bc} - a Z_{ac} Z_{bc})/3/A \\ Y_{02} &= (a^2 Z_{aa} Z_{bb} + a Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} + Z_{aa} Z_{bc} + a Z_{bb} Z_{ac} + a^2 Z_{cc} Z_{ab} - a^2 Z_{ab}^2 - a Z_{ac}^2 \\ &\quad - Z_{bc}^2 - Z_{ab} Z_{ac} - a Z_{ab} Z_{bc} - a^2 Z_{ac} Z_{bc})/3/A \\ Y_{00} &= (Z_{aa} Z_{bb} + Z_{aa} Z_{cc} + Z_{bb} Z_{cc} - 2Z_{aa} Z_{bc} - 2Z_{bb} Z_{ac} - 2Z_{cc} Z_{ab} - Z_{ab}^2 - Z_{ac}^2 - Z_{bc}^2 \\ &\quad + 2Z_{ab} Z_{ac} + 2Z_{ab} Z_{bc} + 2Z_{ac} Z_{bc})/3/A \end{aligned} \right\} \quad (1-47)$$

应用对称分量法时, 若已知支路两端三相电压, 求三相电流, 应先利用关系式 (1-22) 求得三序电压, 再用式 (1-40) 计算三序电流, 最后应用关系式 (1-20) 求得三相电流。

简单电路计算相量法比较简便, 对称分量法比较复杂, 但在复杂电网中还是应用对称分量法较为简便, 详见后面各章分析。

电力系统分析计算中往往已知支路的正序、负序、零序阻抗,在应用相量法计算时,应先将序阻抗转化为相阻抗。设支路三序阻抗矩阵为

$$Z_{120} = \begin{pmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{pmatrix} \quad (1-48)$$

式中 Z_1 、 Z_2 、 Z_0 ——支路的正序、负序、零序阻抗。

由式(1-36)可得

$$Z_{abc} = TZ_{120}T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} Z_1 + Z_2 + Z_0 & aZ_1 + a^2Z_2 + Z_0 & a^2Z_1 + aZ_2 + Z_0 \\ a^2Z_1 + aZ_2 + Z_0 & Z_1 + Z_2 + Z_0 & aZ_1 + a^2Z_2 + Z_0 \\ aZ_1 + a^2Z_2 + Z_0 & a^2Z_1 + aZ_2 + Z_0 & Z_1 + Z_2 + Z_0 \end{pmatrix} \quad (1-49)$$

通常支路的正序阻抗等于负序阻抗,即 $Z_1 = Z_2$ 。那么

$$Z_{abc} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2Z_1 + Z_0 & Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & 2Z_1 + Z_0 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 & 2Z_1 + Z_0 \end{pmatrix} \quad (1-50)$$

在发电机回路和负荷回路中,一般正序阻抗 Z_1 等于负序阻抗 Z_2 ,且零序阻抗为无限大,此时应该用导纳矩阵表示。即支路导纳矩阵为

$$Y_{120} = \begin{pmatrix} Y_1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1-51)$$

式中, $Y_1 = 1/Z_1$, $Y_2 = 1/Z_2$ 。

由式(1-45)可得

$$Y_{abc} = TY_{120}T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} Y_1 + Y_2 & aY_1 + a^2Y_2 & a^2Y_1 + aY_2 \\ a^2Y_1 + aY_2 & Y_1 + Y_2 & aY_1 + a^2Y_2 \\ aY_1 + a^2Y_2 & a^2Y_1 + aY_2 & Y_1 + Y_2 \end{pmatrix} \quad (1-52)$$

第三节 产生不对称的原因

电力系统正常运行产生不对称的原因一般有以下几方面。

一、单回输电线路参数不对称

输电线路的电气特性一般用电阻、电抗、电导和电纳四个参数表征。每相导线都有自参数,每两相导线之间都有互参数。要使输电线路参数处于对称状态必须使各相自参数和各相间互参数均相等。要满足这些条件,就要求各相导线型号一样、导线间距离一样、各相导线对地高度一样、周围环境一样。一般要求导线型号一样容易满足,为了满足后面条件,就要求导线在杆塔上的布置进行整换位,如图1-4所示。

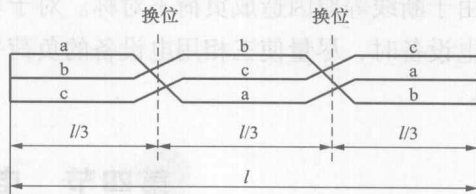


图 1-4 三相导线整换位示意图

由于输电线路经过的地理位置等因素的限制,有时做不到恰巧每三分之一线路长度进行一次换位,有时考虑换位杆塔造价太高,而未进行换位,这样就会使输电线路参数出现不对称的情况。

二、双回输电线路参数不对称

当两条输电线路走向靠近或同杆架设时,则两条输电线路各相之间还存在互电感。目前一般分析中认为两回输电线路之间正序与负序的互电感和互电位为零,因为一回输电线路三相正序(负序)电流(电荷)产生的磁场(电场)合成为零,从而对另一回输电线路不产生影响,只有三相零序电流(电荷)合成不为零,才会对另一回输电线路产生影响,所以两回输电线路之间只计零序互电抗(电纳)。但严格地说,由于未换位或不换位,两条输电线路除了各自参数不对称外,它们各相之间还存在互参数,而且是不对称的。

三、三相变压器参数不对称

变压器的电气特性由电阻、电抗、电导、电纳和变比五个参数表征,分别反映变压器的铜耗、漏电抗、励磁损耗、励磁电抗和分接位置的特性。三相变压器可能是单台三绕组变压器,也可能是由三台单相变压器组成。要使变压器参数处于对称状态,必须要求各绕组的参数都一样。由于变压器材料、结构和工艺等因素的影响,有时不可能使三相绕组的参数完全一样。

四、Vv 接法变压器

电力系统运行中,由于某些原因,变压器临时采用 Vv 接法。还有些牵引变电站为了节省投资也采用 Vv 接法,显然这种变压器三相参数是不对称的。

五、非全相运行

所谓非全相运行系指三相电路中一相或两相断开。一般认为断线是电力系统的故障方式,只有在故障分析中才考虑这种情况。但有些稳态运行时,也会出现非全相运行的情况。例如三相断路器进行合闸操作或分闸操作时,由于断路器质量和控制回路等问题,有时会造成有的相未合或未断开,而调度值班人员未及时发现,造成长期非全相运行。还有当输电线路装有单相自动重合闸时,线路两端断路器一相断开,短路已消失,也会造成非全相运行。

六、三相阻抗参数不对称

由于制造和运行控制等因素的影响,三相补偿电容装置、三相电抗器、交流三相电炉等元件在运行时三相参数可能不相等。

七、牵引变电站负荷不对称

牵引变电站是电气化铁路机车的电源,它的接线方式如图 1-5 所示。变电站变压器低压侧一相接地(接铁轨),机车电源接在非接地相与铁轨之间。例如 b 相接地,机车电负荷接在 a 相与 b 相之间或 c 相与 b 相之间,显然这造成负荷不平衡。

八、三相负荷不平衡

电力用户的负荷有三相负荷,也有单相负荷。例如三相异步电动机、同步电动机都是三相负荷,一般情况下负荷是对称的,但也可能由于断线等原因造成负荷不对称。对于单相负荷,为了满足三相负荷对称的要求,供电部门在配置用电设备时,尽量使三相用电设备的负荷平衡。但由于电力用户的随机性,很难保证三相负荷同时相等。

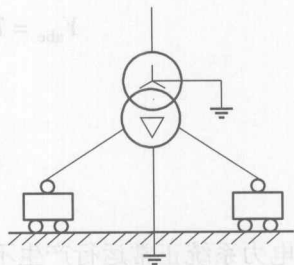


图 1-5 牵引变电站接线示意图

第四节 电网不对称运行的影响

电力系统中的三相电气设备都是按对称条件进行设计的。在三相对称情况运行,其效率和性能最佳,而在不对称情况运行,其效率和性能将下降。严重时,甚至造成电气设备寿命下降和损坏。对电力系统整体而言,不对称将影响电网的安全、电能质量和经济性能,现将具体的影响分析如下。

一、对同步发电机运行的影响

根据对称分量法,三相不对称量可以分解为正序分量、负序分量和零序分量。我国同步发电机中性点一般采用小电流接地方式,因此同步发电机三相基频(正常运行频率)电流可分解为基频正序电流和基频负序电流。定子三相基频正序电流产生的旋转磁场的旋转方向与转子的旋转方向一致。当定子旋转磁场速度与转子的旋转速度相等时,定子旋转磁场与转子相对静止,定子旋转磁场对转子励磁绕组电流产生的磁场起着去磁作用。而定子基频负序电流产生的旋转磁场的旋转方向与转子旋转方向相反,它在转子绕组和铁芯感应出2倍基频分量的电动势,从而产生2倍基频分量的电流和脉动磁场。由于转子绕组是单相绕组,其脉动磁场可分解为两个正、反方向旋转的旋转磁场。其中与转子旋转方向相反且以两倍基频速度旋转的旋转磁场与定子基频负序电流产生的旋转磁场相对静止,并起着去磁作用。而另一个与转子旋转方向相同且以2倍基频速度旋转的旋转磁场相对于定子绕组为3倍基频速度,从而在定子绕组中感应出3倍基频分量的正序电动势。由于定子绕组连接的电网处于不对称状态,这组正序电动势将在定子绕组中产生3倍基频分量的三相不对称电流。根据对称分量法,定子绕组3倍基频不对称电流又可分解为正序、负序分量电流。其中3倍基频正序电流产生的旋转磁场与转子绕组2倍基频电流产生的正方向旋转磁场相对静止,并起着去磁作用。而定子绕组3倍基频负序电流产生的旋转磁场以3倍基频速度与转子旋转方向相反旋转,将在转子绕组的和铁芯感应出4倍基频分量的电动势,继而产生4倍基频分量的电流和脉动磁场,与前面分析相似,又可以分为正、反方向的两个旋转磁场,其中与转子旋转方向相反,并以4倍基频速度旋转的磁场,与定子绕组3倍基频负序电流产生的旋转磁场相对静止,并起着去磁作用。另一个与转子旋转方向相同,并以4倍基频速度旋转的磁场,相对于定子绕组为5倍基频速度,从而在定子绕组中感应出5倍基频的电动势,由于定子绕组连接的电网处于不对称状态,这组电动势将在定子绕组中产生5倍基频分量的三相不对称电流,……,依次类推。由此可见,定子绕组基频负序电流将在转子绕组和铁芯产生一系列的偶次谐波电流分量,在定子绕组产生一系列的奇次谐波电流分量。由于电网不对称状态是长期存在的,定子绕组的基频负序电流也将长期存在,定子绕组、转子绕组和铁芯的谐波电流分量也将长期存在。其中转子绕组和铁芯的二次谐波与定子绕组的三次谐波电流最为明显。定子绕组、转子绕组和铁芯的谐波电流将使发电机损耗增加,温度升高,效率降低。严重时降低发电机寿命和造成绕组损坏,特别是转子及其表面,同时还会增加机组振动。因为定子绕组基频负序电流和转子励磁绕组直流电流产生的磁场,在转子轴上形成的转矩是2倍基频交流转矩,从而使转子振动增加。若转轴自然振动频率为2倍基频时,可能引起共振,造成转轴断裂。据有关部门统计,我国电网因非全相运行造成发电机转子损坏的事故已发生过十几起,这说明不对称运行对电网是十分有害的。因此各国对电力系统运行的不对称度,即负序分量与正序分量之比,都有严格的规定。我国规定发电机负序电流与正序电流之比不得超过5%~10%,这与发电机的结构、冷却方式等因素有关。散热条件好的规定高一些,反之规定低一些。

二、对异步电动机运行的影响

异步电动机中性点一般也是不接地的,因此异步电动机不对称三相电流同样只可分解为正序分量和负序分量,正序分量电流产生基频旋转磁场。设转差率为 s ,转子则以 $(1-s)$ 的速度旋转(基频的速度为1),所以在转子绕组中感应的电流为 s 频率的电流。异步电动机转子绕组是三相绕组,其三相电流产生旋转磁场的速度相对转子为 s 频率的速度,相对定子为基频速度,对定子正序电流产生的磁场起着去磁作用。它们相互作用产生正序转矩(功率)。而定子绕组负序电流产生反向磁场,相对于转子为 $(2-s)$ 速度,因此在转子绕组感应 $(2-s)$ 基频电动势和电流。它产生的旋转磁场对定子负序电流产生的旋转磁场起着去磁作用。它们相互作用产生负序转矩(功率),其方向与正序转矩反向。另外,由定子正序电流产生的磁场与转子 $(2-s)$ 频率电流的相互作用,定子负序电流产生的磁