

DIANLIBIANYA QI JIANXIU YU WEIHU

电力变压器

检修与维护

冯超 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANLIBIANYAQI JIANXIU YU WEIHU

电力变压器

检修与维护

冯超 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



前 言

变压器检修技术涉及面广、实践性强，一般需具备一定的理论基础和工作经验。为缩短认知差距，减低学习难度，本书科学运用大量实例与图例，对理论知识、结构原理和工艺方法加以说明，其内容直观生动、便于理解，可达到了事半功倍的效果。

图文结合、贯穿实例是本书的最大特色。为确保图示效果，作者绘制大量二维、三维图形，以合理的视角展示基本概念、设备结构、控制原理、动作过程以及新型工艺方法，在提高学习效率的同时，有助于加深理解，适合作为一线生产技术人员的技术辅导书。

全书主要分为三个部分。第一部分介绍基本原理，包括第1、第2章，应用大量图例、实例对基本概念和分析计算方法进行说明；第二部分包括第3、第4章，主要介绍设备结构，为便于清晰表述，插入大量二维、三维图形；第三部分主要讲述变压器的检修试验与运行维护，包括第5~第8章，引用大量检修实例及最新技术标准，生动阐明检修工作的方法和思路，力求使读者能够举一反三，快速提高工作能力。

因水平有限，书中会存在不妥之处，恳请读者给予批评指正。

作 者

2012年9月



目 录

前言

1 磁路

- 1.1 基本概念 1
- 1.2 磁路分析 7

2 变压器原理

- 2.1 结构原理及分类 15
- 2.2 工作原理 16
- 2.3 参数变换 19
- 2.4 三相变压器的连接方式 29
- 2.5 变压器的铭牌和技术数据 34
- 2.6 变压器的外特性 36
- 2.7 变压器的效率 37
- 2.8 特殊变压器 40

3 电力变压器结构

- 3.1 铁芯 44
- 3.2 绕组 51
- 3.3 套管结构 62
- 3.4 无励磁分接开关的原理和结构 67
- 3.5 变压器油箱 69

3.6	变压器油	70
3.7	储油柜	73
3.8	冷却系统	77
3.9	气体继电器	79
3.10	压力释放器	80
3.11	突发压力继电器	81
3.12	接地装置	81

4 有载分接开关

4.1	有载分接开关的原理	82
4.2	复合型有载分接开关	90
4.3	组合型有载分接开关	107
4.4	真空型有载分接开关	131
4.5	有载分接开关的保护装置及附属装置	138

5 变压器检修原则

5.1	基本原则	173
5.2	主变压器的检修类别和项目	173
5.3	检修策略	176
5.4	检修评估	176

6 电气试验

6.1	变压器试验分类及周期	178
6.2	110kV 及以上主变压器试验项目及方法	178
6.3	试验顺序选择	192
6.4	110kV 及以上主变压器实施 A 类检修后的试验 项目及标准	192

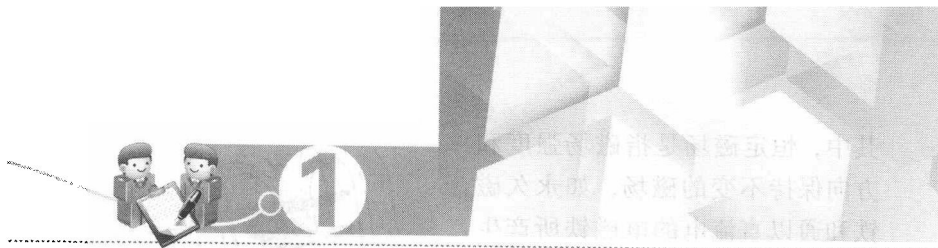
7 变压器检修与维护工艺

7.1 变压器本体检修	195
7.2 变压器附件检修 (B类检修)	209
7.3 注油和滤油作业 (B类检修)	239
7.4 非电量保护装置检修	244
7.5 变压器维护工艺	246

8 变压器故障实例分析与处理

8.1 渗漏缺陷	251
8.2 套管缺陷	255
8.3 有载分接开关缺陷	258
8.4 油枕缺陷	281
8.5 压力释放器故障	282
8.6 风冷系统缺陷 (一)	283
8.7 风冷系统缺陷 (二)	289
8.8 器身故障	292

参考文献	295
------------	-----



磁 路

1.1 基 本 概 念

1.1.1 磁场

磁场是在电流、运动电荷、磁体或变化电场的周围空间存在的一种特殊形态的物质。磁体的磁性源于电流，电流是电荷的运动，因而可概括地说，磁场是由运动电荷或变化电场产生的。图1-1表示运动电荷产生的磁场，图1-2表示变化的电场产生的磁场。

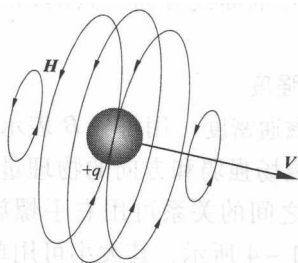


图1-1 运动电荷产生磁场
 V —电荷运动速度矢量； q —带电粒子所带电量； H —磁场强度

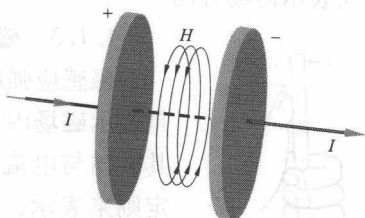


图1-2 变化的电场产生磁场
 I —电流； H —磁场强度

磁场能对其中的运动电荷施加作用力，表现为磁场对电流和磁体的作用力。电磁场是电磁作用的媒介，电场和磁场是其紧密联系、相互依存的两个侧面，变化的电场产生磁场，变化的磁场产生电场。

磁场分为恒定磁场、交变磁场、脉动磁场、脉冲磁场等。

其中，恒定磁场是指磁场强度和方向保持不变的磁场，如永久磁铁和通以直流电的电磁铁所产生的磁场。交变磁场是指磁场的强度和方向会发生周期性变化的磁场。通有工频交流电源的线圈所产生的磁场即为交变磁场，如图 1-3 所示。同理，运行中的工频变压器铁芯中的磁场也是交变磁场。

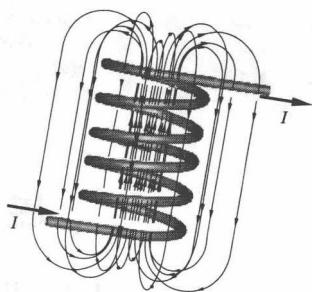


图 1-3 通电线圈产生磁场
I—通过电流

1.1.2 磁感应线

磁感应线（磁力线）是在磁场中画一些有方向的曲线，任何一点的曲线方向都与放在该点的磁针北极所指的方向一致。磁感应线用来形象地描述空间磁场情况的假想曲线，能利用其疏密表示磁场的强弱；与曲线上任一点的曲线方向一致的切线方向表示磁场方向。



图 1-4 右手螺旋定则

1.1.3 磁感应强度

磁感应强度（磁通密度）用符号 B 表示，是表示磁场内某点磁场强弱和方向的物理量，其方向与电流方向之间的关系可用右手螺旋定则表示，如图 1-4 所示，其大小可用单位长度导线所受磁场力来表示，公式为 $B = \frac{F}{I}$ ，单位为特斯拉（T）。

1.1.4 磁通量

设在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，有一个面积为 S 且与磁场方向垂直的平面，磁感应强度 B 与面积 S 的乘积，叫做穿过这个平面的磁通量，简称磁通。其大小可用公式 $\Phi = BS$ 反映，适用条件是 B 与 S 平面垂直。当 B 与 S 存在夹角 θ 时， $\Phi = BS\sin\theta$ ，如图 1-5 所示。

磁通量的单位是韦伯 (Wb), $1\text{Wb} = 1\text{T} \times 1\text{m}^2$ 。磁通量的意义可以用磁感线形象地说明, 在同一磁场的图示中, 磁感线越密的地方, 也就是穿过单位面积的磁感线条数越多的地方, 磁感应强度 B 越大。因此, B 越大, S 越大, 穿过这个面的磁感线条数就越多, 磁通量就越大。磁铁周围的磁力线都是从 N 极出来进入 S 极, 在磁体内部磁力线从 S 极到 N 极。

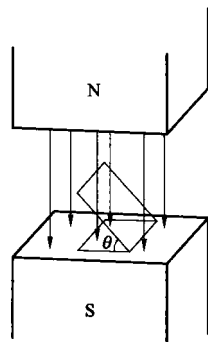


图 1-5 磁通量计算

1.1.5 磁场强度

磁场强度用以反映磁场的源强弱, 磁感应强度则表示磁场源在特定环境下的效果。磁场强度用符号 H 表示, 计算公式为 $\oint Hdl = \sum I$, $\oint Hdl$ 是磁场强度矢量沿任意闭合线 (常取磁通作为闭合回线) 的线积分; $\sum I$ 是穿过闭合回线所围面积的电流的代数和, 其电流的正负由右手螺旋定律决定。以上将磁场强度与电流联系起来的规律称为“安培环路定律”或“全电流定律”。

1.1.6 磁导率

磁导率是表示磁场介质磁性的物理量, 衡量物质的导磁能力, 用 μ 表示, 其单位是亨/米 (H/m), 计算公式为 $\mu = \frac{B}{H}$ 。真空的磁导率为常数, 用 μ_0 表示, 有 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。而相对磁导率 μ_r 用来表征任一种物质的磁导率 μ 和真空的磁导率 μ_0 的比值, $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu H}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}$ 。

铁磁性物质的磁导率很高, $\mu \gg \mu_0$, 如铸铁为 200 ~ 400, 硅钢片为 7000 ~ 10 000。

1.1.7 磁阻

磁阻用来表征材料的阻磁特性。由公式 $\oint Hdl = \sum I$, $F = NI$, $NI = Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{\Phi}{\mu S}l$, 可得出 $\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m}$, 即 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 。磁通

量总是形成一个闭合回路, 但路径与周围物质的磁阻有关, 它总是集中于磁阻最小的路径。空气和真空的磁阻较大, 而容易磁化的物质, 例如软铁, 则磁阻较低。因此, 对于运行中的变压器, 其磁通集中在铁芯之中。

1.1.8 磁动势

磁动势又称磁通势, 标准定义是电流流过导体所产生磁通量的势力, 是用来度量磁场或电磁场的一种量, 类似于电场中的电动势或电压。计算公式为 $F = \Phi R_m$ 或 $F = NI$, Φ 为磁通量, R_m 为磁阻, N 为导线匝数, I 为导线中的电流。前者称为磁路欧姆定律或霍普金斯定律。

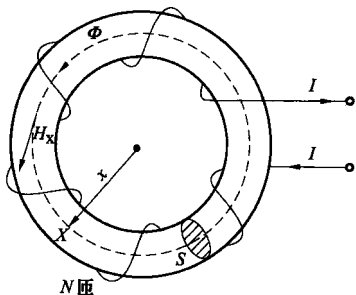


图 1-6 【例 1-1】示意图

【例 1-1】 如图 1-6 所示, 环形线圈中的媒质是均匀的, 磁导率为 μ , 线圈中流过电流为 I , 线圈匝数为 N , 媒质横截面为 S , 试计算线圈内部各点的磁感应强度。

解: 取磁通作为闭合圆周回线, 以其方向作为回线的围绕方向, 则有

$$\oint Hdl = \sum I$$

在圆环内取一点 X , 距圆环中心轴线的距离为 x , 则

$$\oint Hdl = H_x l_x = H_x \times 2\pi x$$

其中 $l_x = 2\pi x$ 是半径为 x 的圆周长

$$\sum I = NI$$

$$H_x \times 2\pi x = NI$$

故得

$$H_x = \frac{NI}{2\pi x} = \frac{NI}{l_x}$$

$$B_x = \mu H_x = \mu \frac{NI}{l_x}$$

由【例 1-1】可见，磁场内某点的磁场强度 H 只与电流大小、线圈匝数以及该点的几何位置有关，与磁场媒质的导磁性无关，而磁感应强度 B 则与磁场媒质的导磁性有关。

1.1.9 磁畴

磁畴即磁性物质内部形成许多小区域，其分子间存在的一种特殊的作用力使每一区域内的分子磁场排列整齐，显示磁性。

在没有外磁场作用的普通磁性物质中，各个磁畴排列杂乱无章，磁场互相抵消，整体对外不显磁性。

如图 1-7 所示，在外磁场作用下，磁畴方向发生变化，使之与外磁场方向趋于一致，物质整体显示出磁性来，称为磁化，即磁性物质能被磁化。磁性物质被磁化后，产生的磁场叠加于外部磁场之上，使其得到增强，这就是变压器采用铁芯的原因。

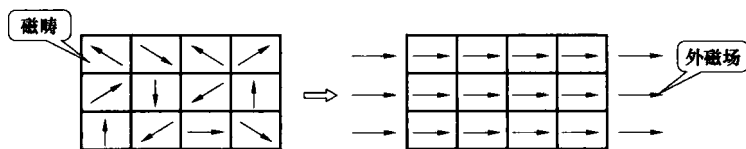


图 1-7 磁畴在外磁场作用下方向趋于一致

1.1.10 磁饱和性

磁饱和性是指磁性物质由于磁化所产生的磁化磁场不会随着外磁场的增强而无限的增强。当外磁场增大到一定程度时，

磁性物质的全部磁畴的磁场方向都与外部磁场方向一致，磁化磁场的磁感应强度将趋向某一定值，如图 1-8 所示。

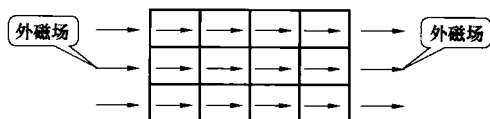


图 1-8 磁畴在外磁场作用下方向趋于一致，导磁体达到饱和状态

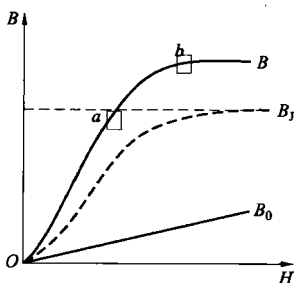


图 1-9 磁化曲线

不同的磁性物质有着各自的磁化曲线，如图 1-9 所示。直线 B_0 表示磁场内不存在磁性物质时的磁感应强度直线，曲线 B_J 表示磁场内磁性物质的磁化磁场的磁感应强度曲线；曲线 B 表示曲线 B_J 和直线 B_0 的纵坐标相加后所形成的实际磁场的 $B-H$ 磁化曲线。

$B-H$ 磁化曲线的特征：

- (1) Oa 段： B 与 H 几乎成正比地增加；
- (2) ab 段： B 的增加缓慢下来；
- (3) b 点以后： B 增加很少，达到饱和。

由曲线可知，有磁性物质存在时， B 与 H 不成正比，磁性物质的磁导率 μ 不是常数，随 H 而变，最终导致磁通 Φ 与电流 I 不成正比。

磁性物质的磁化曲线为非线性曲线，在磁路计算上极为重要，实际中通过实验得出。

1.1.11 磁滞性

磁滞性是指磁性材料中磁感应强度 B 的变化总是滞后于外磁场变化的性质。

磁性材料在交变磁场中反复磁化，其 $B-H$ 关系曲线是一条

回形闭合曲线，称为磁滞回线，如图 1-10 所示。

图 1-10 中 B_r 表示剩磁感应强度，即当线圈中电流减小到零 ($H=0$) 时，铁芯中的磁感应强度； H_c 表示矫顽磁力，即为了清除剩磁，所必须施加的磁场强度 H 值。

磁性物质不同，其磁滞回线和磁化曲线也不同。

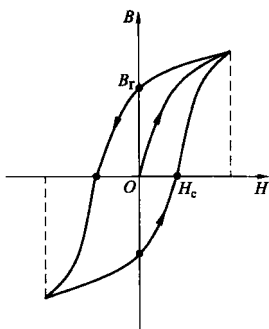


图 1-10 磁滞回线

1.2 磁路分析

1.2.1 磁路与电路的相似之处

磁路与电路的相似点见表 1-1。

表 1-1 磁路与电路的相似点

相似点	磁路	电路
动势	磁动势 F	电动势 E
场强	磁场强度 H	电场强度 E
能量流	磁通 Φ	电流 I
能量流密度	磁感应强度 B	电流密度 J
导纳	磁导率 μ	电导率 g
阻碍	磁阻 R_m	电阻 R
回路形式		
计算公式	$\phi = \frac{F}{R_m} = \frac{NI}{\mu S}$	$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{l}{gS}$

1.2.2 磁路与电路的区别

(1) 在处理电路时不涉及电场问题, 在处理磁路时离不开磁场的概念。

(2) 在处理电路时一般可以不考虑漏电流, 在处理磁路时一般都要考虑漏磁通。

(3) 磁路欧姆定律和电路欧姆定律只是在形式上相似。由于 μ 不是常数, 随励磁电流而变, 磁路欧姆定律不能直接用来计算, 只能用于定性分析。

(4) 在电路中, 当 $E=0$ 时, $I=0$; 但在磁路中, 由于有剩磁, 当 $F=0$ 时, 磁通量 Φ 不为零。

1.2.3 磁路的分析计算

一、基本方法

在不考虑漏磁通的情况下, 磁路中各部分磁通 Φ 相等。所以应预先选定磁性材料中的磁通 Φ (或磁感应强度), 按照所定的磁通、磁路各段的尺寸和材料, 求产生预定的磁通所需要的磁通势 $F=NI$, 确定线圈匝数和励磁电流。

二、基本公式

设磁路由不同材料或不同长度和截面积的 n 段组成, 则总磁势可由式 (1-1) 表示

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \cdots + H_n l_n$$

即
$$NI = \sum_{i=1}^n H_i l_i \quad (1-1)$$

三、基本步骤 (由磁通 Φ 求磁动势 $F=NI$)

第一步, 求各段磁感应强度 B_1 , 各段磁路截面积不同, 通过同一磁通 Φ , 则各段磁感应强度如式 (1-2) 所示

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}, B_2 = \frac{\Phi}{S_2}, \cdots, B_n = \frac{\Phi}{S_n} \quad (1-2)$$

第二步, 求各段磁场强度 H_i , 根据各段磁路材料的磁化曲线 $B_i = f(H_i)$, 求 B_i 相对应的 H_i ;

第三步, 计算各段磁路的磁压降 ($H_i l_i$)

第四步，根据式 (1-3) 求出磁通势 (NI)

$$NI = \sum_{i=1}^n H_i l_i \quad (1-3)$$

【例 1-2】 一个闭合、均匀的铁芯线圈，其匝数为 300，铁芯中的磁感应强度为 0.9T，磁路的平均长度为 45cm，试求：

- (1) 铁芯材料为铸铁时线圈中的电流；
- (2) 铁芯材料为硅钢片时线圈中的电流。

解：(1) 查铸铁材料的磁化曲线，当 $B = 0.9\text{T}$ 时，磁场强度 $H = 9000\text{A/m}$ ，则

$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{9000 \times 0.45}{300} = 13.5 \text{ (A)}$$

(2) 查硅钢片的磁化曲线，当 $B = 0.9\text{T}$ 时，磁场强度 $H = 260\text{A/m}$ ，则

$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{260 \times 0.45}{300} = 0.39 \text{ (A)}$$

结论：如果要得到相等的磁感应强度，采用磁导率高的铁芯材料，可以降低线圈电流，减少用铜量。

【例 1-3】 有一环形铁芯线圈，内径为 5cm，外径为 10cm，铁芯材料为铸钢。磁路中含有一空气隙，长度 δ 为 0.2cm。设线圈中通有 1A 的电流，如要得到 0.9T 的磁感应强度，试求线圈匝数。

解：空气隙的磁场强度

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.9}{4\pi \times 10^{-7}} = 7.2 \times 10^5 \text{ (A/m)}$$

查铸钢的磁化曲线， $B = 0.9\text{T}$ 时，磁场强度 $H_1 = 500\text{A/m}$ 。
磁路的平均总长度

$$l = \frac{10 + 15}{2} \pi = 39.2 \text{ (cm)}$$

铁芯的平均长度

$$l_1 = l - \delta = 39.2 - 0.2 = 39 \text{ (cm)}$$

对各段有

$$H_0 \delta = 7.2 \times 10^5 \times 0.2 \times 10^{-2} = 1440 \text{ (A)}$$

$$H_1 l_1 = 500 \times 39 \times 10^{-2} = 195 \text{ (A)}$$

总磁通势

$$NI = H_0 \delta + H_1 l_1 = 1440 + 195 = 1635 \text{ (A)}$$

线圈匝数

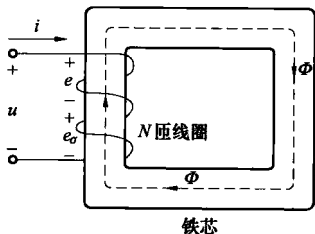
$$N = \frac{NI}{I} = \frac{1635}{1} = 1635$$

结论：当磁路中含有空气隙时，由于其磁阻较大，磁通势几乎都降在空气隙上面，所以要得到相等的磁感应强度，必须增大励磁电流（设线圈匝数一定）。

1.2.4 电路的分析计算

一、电磁关系（交流铁芯线圈电路）

如图 1-11 所示，主磁通 Φ 为通过铁芯闭合的磁通，它与磁路上的所有绕组交链，并产生感应电动势，电动势大小和磁通变化率与所交链绕组的匝数成正比，可通过式 (1-4) 得出



$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-4)$$

图 1-11 电磁关系

漏磁通 Φ_σ 为经过空气或其他非导磁媒质闭合的磁通，并未与主磁路上的所有绕组交链，其感应电动势大小与漏磁通所交链绕组匝数、漏磁通变化率呈正比，即与漏电抗、所交链绕组电流变化率呈正比，如式 (1-5) 所示。

$$e_\sigma = -N \frac{d\Phi_\sigma}{dt} = -L_\sigma \frac{di}{dt} \quad (1-5)$$

受磁化曲线影响, Φ 与 i 不是线性关系。而空气磁导率 μ_0 是常数, $\psi_\sigma = \frac{\mu_0 n S i}{l} \propto i$, 其中, n 为漏磁通所交链的绕组匝数, ψ_σ 为漏磁通在匝绕组上叠加形成的磁链, S 为绕组所围截面积, i 为绕组电流, l 为漏磁通环路的平均长度, 进而得出铁芯线圈的漏磁电感为常数 $(L_\sigma = \frac{N\Phi_\sigma}{i})$ 。

根据基尔霍夫方程

$$u = Ri - e_\sigma - e = Ri + L_\sigma \frac{di}{dt} + (-e)$$

式中: R 为线圈导线的电阻; L_σ 为漏磁电感。

当 u 是正弦电压时, 其他各电压、电流、电动势可视为正弦量, 则

$$\begin{aligned} L_\sigma \frac{di}{dt} &= \frac{\omega L_\sigma I_m \sin\omega t}{\omega dt} = \frac{X_\sigma I_m d\sin\omega t}{d\omega t} = X_\sigma I_m \cos\omega t \\ &= -X_\sigma I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = jX_\sigma \dot{i} \end{aligned} \quad (1-6)$$

所以电压和电流的关系为

$$\dot{U} = R\dot{I} + (-\dot{E}_\sigma) + (-\dot{E}) = R\dot{I} + jX_\sigma \dot{I} + (-\dot{E}) \quad (1-7)$$

设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin\omega t$, 则

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin\omega t) = -N\omega\Phi_m \cos\omega t \\ &= 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-8)$$

有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \Phi_m \quad (1-9)$$

由于线圈电阻 R 和感抗 X_σ (或漏磁通 Φ_σ) 较小, 其电压降也较小, 与主磁电动势 E 相比可忽略, 故有

$$\dot{U} = R\dot{I} + (-\dot{E}_\sigma) + (-\dot{E}) \approx -E = 4.44 f N \Phi_m = 4.44 f N B_m S \quad (1-10)$$

式中: B_m 为铁芯中磁感应强度的最大值; S 为铁芯截面积。