

电流互感器之原理与設計

趙 乃 九 編

科学技術出版社

电流互感器之原理与設計

趙 乃 九 編

沈 越 昭 校

科 学 技 術 出 版 社

內 容 提 要

本書內容包括電流互感器之一般原理、運轉特性、應用範圍、型式結構、設計原理及其試驗方法等；對於設計時過電流特性之計算，亦作必要之介紹。

本書可供電機製造工程技術人員，在設計時參考之用。而從事控制線路設計、繼電保護工作以及工業企業供電之工程技術人員，對於進一步了解電流互感器之特性，亦有參考之必要。

電流互感器之原理與設計

編 著 者 趙 乃 九

校 閱 者 沈 越 昭

科學技術出版社出版

(上海建國西路336弄1號)

上海市書刊出版業營業許可証出〇七九號

上海新華印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統一書號：15119·37

(原電世界版印3,000冊)

開本 850×1168 1/32 · 印張 4 1/2 · 字數 100,000

一九五〇年三月新一版

一九五六年八月第二次印刷 · 印數 1,021-2,520

定價：(10) 八角五分

序 言

電流互感器爲現代量電線路、控制線路及保護系統中不可缺少的電工儀器之一。本書說明電流互感器之一般原理與設計程序；對於設計電流互感器之原則以及如何掌握設計方法，均作有系統之介紹。

全書共分六章：其中一、二、三、六各章資料之來源，部份根據 (1) Hague: "Instrument Transformer" (2) Liwshitz: "Electric Machinery, II." (3) АВТОР: "Расчет и Конструирование Высоковольтной Аппаратуры" (4) Liwshitz: "Die Elektrischen Maschinen, Band III" (5) Stafford: "Troubles of Electrical Equipment. (6) AIEE Transaction, 1940. (7) AIEE Transaction, 1942. (8) Knowlton: "Electric Power Metering"; 第四、五章之設計方法與設計實例，爲編者根據自己工作之體味與經驗而加以編著。

目前國內專論電流互感器之書籍甚少。編者學識陋淺，勉爲此書，冀拋磚引玉，以期今後專論電流互感器之書籍，能因之而增多。

讀者對於此書如有批評與建議，編者深表歡迎，以期再版時充實之。

編者趙乃九

一九五五年二月上海

本書採用符號表

A

A_1 = 瓦特小時計 A 接於互感器 1 時之轉數

A_2 = 瓦特小時計 B 接於互感器 2 時之轉數

A_c = 鐵芯之淨面積

A_{cg} = 鐵芯之毛面積

AT = 安培匝數

AT_u = 有功激磁安培匝數

AT_r = 無功激磁安培匝數

A_w = 窗口面積

A_y = 鐵軛之淨截面面積

A_{yg} = 鐵軛之毛截面面積

a = 空載電流與一指定副級電流之比

a = 環形鐵芯之軸向厚度

a_1 = 原級側絕緣導線之厚度

at_u = 有功單位激磁安培匝數

at_j = 磁力線通過鐵芯每一聯接點所需之安培匝數

at_r = 無功單位激磁安培匝數

B

B_1 = 瓦特小時計 B 接於互感器 1 時之讀數

B_2 = 瓦特小時計 B 接於互感器 2 時之讀數

B_c = 鐵芯之磁通密度

B_s = 漏磁通密度

B_{sat} = 鐵芯飽和磁通密度

B_y = 鐵軛之磁通密度

b = 環形鐵芯之軸向間隙

b_1 = 原級側絕緣導線之間隙

C

C = 校正係數

C = 環形鐵芯之內圓周

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ = 空隙係數

D

D = 鐵芯之外接圓直徑

D_1 = 副級絕緣筒之內徑

D_2 = 副級繞組之內徑

D_3 = 副級繞組之外徑

D_4 = 原級絕緣筒之內徑

D_5 = 原級繞組之內徑

D_6 = 原級繞組之外徑

D_m = 原級繞組之平均直徑

D_1 = 環形鐵芯之內徑

D_o = 環形鐵芯之外徑

d_2 = 副級導線之絕緣直徑

d_p = 原級繞組厚度

d_s = 副級繞組厚度

E

E = 電流讀數差誤

E_1 = 原級感應電勢

E_2 = 副級感應電勢

E_s = 漏磁通感應電勢

e_i = 每匝線圈之電壓

F

F = 兩接線端所生應力

F_c = 電流比因數

F_p = 繞軸向應力之垂直分量

F_r = 繞軸向應力

f = 週率

f_w = 窗口高與闊之比

f_{wd} = 鐵軛放大率

G

G_s = 鐵芯之總重量

G_k = 線捲之總重

G_{k1} = 原級繞組之銅重

G_{k2} = 副級繞組之銅重

H

H = 磁場強度

h = 電流為 i 時之磁場強度

h = 銀捲軸向長度

h_1 = 原級繞組之高度

h_2 = 副級繞組之高度

h_s = 環形鐵芯繞組兩端之空隙

h_{e1} = 原級繞組每端對鐵之空隙

h_{e2} = 副級繞組每端對鐵之空隙

h_r = 電抗高度

h_y = 鐵軛高度

h_w = 窗口高度

I

I_1 = 原級電流

I_2 = 副級電流

$I_1' = I_2$ 之反向量

$I_2' = I_2 / k_T$

I_{2m} = 副級電流無功分量

I_{2w} = 副級電流有功分量

I_{2T} = 換算於副級側之原級電流

I_0 = 激磁電流

I_m = 激磁電流之無功分量

I_{mT} = 換算於副級側之原級無功電流

I_{n1} = 額定原級電流

I_{n2} = 額定副級電流

I_0 = 空載電流

I_{sc} = 短路電流之有效值

i_{sc} = 短路電流之瞬間值

I_{sh} = 分路電流

I_w = 激磁電流之有功分量

I_{wT} = 換算於副級側之原級有功電流

J

J = 短路電流之電流密度

J_1 = 原級繞組之電流密度

J_2 = 副級繞組之電流密度

J_n = 額定電流時之電流密度

K

K = 雙迴路系統之耦合度

K = 瓦特小時計公稱瓦小時

K_{cmrx} = 最大比率

K_c = 實在電流比

K_{c1}, K_{c2} = 兩互感器之標定百分率

K_m = 機械強度

K_{ne} = 標稱電流比

K_s = 飽和度

K_T = 圈數比

K_t = 熱容量

K_v = 電壓比率

K_v = 原級側電壓比

k = 漏磁校正係數

L

L_1 = 原級側電感

L_1 = 原級繞組之總長度

L_{1s} = 原級側漏磁電感

L_2 = 副級側電感

L_2 = 副級繞組之總長度

L_s = 漏磁電感

L_{2s} = 副級側漏磁電感

l_k = 環形鐵芯副級繞組每圈之平均長度

l_{k1} = 原級繞組每圈之平均長度

l_{k2} = 副級繞組每圈之平均長度

M

M = 雙交鏈電路之互感

N

n = 最大副電流倍數

n_1 = 原級繞組之層數

n_2 = 副級線圈之層數

P

P = 副級有效漏磁途徑

 P_p = 在 T° 時銅線之萎點壓力 $p = a$ 之函數 p = 矩形鐵芯截面之闊度

Q

 q = 矩形鐵芯截面之長度 q = 原級全線捲數

R

 R'' = 副級電路內可調節電阻器之電阻 R_1 = 原級繞組電阻 R_2 = 副級繞組電阻 R_b = 負載電阻 R_c = 副級繞組溫升試驗前之冷電阻 R_o = 短路未開始前之線捲電阻 R = 四端電阻器電阻 R_s = 將互感器之原級短路而在副級側量得之電阻 R_{sh} = 分路電阻 $R_T = R_2 + R_b$ R_t = 副級繞組溫升試驗後之熱電阻 r = 三端電阻器之電阻 r_1, r_2, r_p, r_s = 電阻調節器之電阻

S

 s_k = 銅線截面 s_{k1} = 原級導線截面 s_{k2} = 副級導線截面

T

 t_{1y} = 原級繞組每層之匝數 t_{2y} = 副級繞組每層之匝數

U

 U = 平均漏磁周徑

V

 V_1 = 原級端電壓 (VA) = 單位激磁伏安 V_2 = 副級端電壓 $[VA]$ = 總激磁伏安 V_c = 鐵芯總體積 V_{c1} = 鐵芯之鐵柱體積 V_{Ls} = 鐵芯四角之體積 V_{cy} = 鐵芯之鐵軛體積

W

 W = 漏磁場磁能 W_c = 總的鐵損失 w_1 = 原級繞組匝數 w_2 = 副級繞組匝數 w_e = 單位鐵損失 w_m = 單位磁化伏安 w_w = 窗闊

X

 X_1 = 原級線捲電抗 X_2 = 副級線捲電抗 X_b = 負載電抗 $X_T = X_2 + X_b$

Y

 Y_e = 主磁通導納

Z

 Z_1 = 原級線捲阻抗 Z_2 = 副級線捲阻抗 Z_b = 負載阻抗 Z_e = 主磁通阻抗 $Z_T = Z_2 + Z_b$ α α = 銅線之電阻係數 β β = 相角 γ

γ_k = 銅線之密度

δ

δ = 原級與副級線捲在軸向位移之距離

δ_s = 空間因數

ϵ

ϵ_s = 電流比差

ϵ_T = 圈數比差

θ

θ_1, θ_2 = 原級副級側功率因數角

ϑ_1 = 短路初終瞬間之線捲平均溫度

ϑ_2 = 短路未開始間之線捲平均溫度

ϑ = 由 ϑ_1 至 ϑ_2 一段時間內線捲之溫度

μ

μ = 導磁係數

ξ

ξ = 激磁角

ρ

ρ_0 = 銅線在 $t^\circ\text{C}$ 時電阻率

σ

σ = 白朗斯爾漏磁因數

σ = 銅線之比熱

τ

τ = 海倫漏磁因數

τ_1, τ_2 = 漏磁因數

φ

φ = 磁通

φ_{1g} = 原級部份共同磁通

φ_{1s} = 原級漏磁通

φ_{2g} = 副級部份共同磁通

φ_{2s} = 副級漏磁通

φ_m = 主磁通

φ_0 = 磁化角

φ_2 = 副級側阻抗角

$\varphi_3 = I_2 T - 5E_2$ 之相位移

ω

ω = 角速度

目 錄

本書採用符號表.....	1
--------------	---

第一章 緒論

1—1 儀用互感器之應用	1
1—2 儀用互感器與變壓器之比較	2
1. 變壓器之原理.....	2
(1) 空載電壓圖	2
(2) 變壓器在負載情況下之特性	4
(3) 副級線捲之漏磁	6
(4) 負載情況下變壓器之電壓圖	7
2. 儀用互感器與變壓器之比較.....	9
(1) 電壓互感器與變壓器之區別	9
(2) 電流互感器與電壓互感器之區別及其應用上所存在之誤差	10
1—3 電流互感器比差與角差之定義	11
1—4 電流互感器之規範與標準	13
1. 各種規範之定義.....	13
(1) 容量	13
(2) 電壓	13
(3) 電流	13
(4) 週率	14
(5) 精密度	14
(6) 角差	14
(7) 溫升	14

(8) 熱容量	14
(9) 機械強度	14
(10) 飽和倍數	14
(11) 最大副級電流倍數	15
2. 電流互感器之標準	15

第二章 電流互感器之原理與運轉

2-1 向量圖	18
2-2 比差與角差之示式	19
1. 計算法	19
2. 圖解法	21
3. 極大電流比與零角差之條件	22
2-3 過負載電流對於比差與角差之影響	24
2-4 短路電流對於運轉特性之影響	28
1. 最大副級電流倍數	28
2. 飽和倍數	29
3. 熱容量	29
4. 機械強度	32
2-5 漏磁電抗之計算	36
1. 概念	36
2. 漏磁之計算	39
(1) 筒形繞組	42
(2) 雙筒形繞組	42
(3) 環形鐵心繞組	42
2-6 電流互感器之運轉	43
1. 電流互感器之副級側不能開路	43
2. 選用電流互感器對於容量之決定	43

3. 儀用互感器之結線	44
4. 電流互感器用以運轉繼電器	46

第三章 構造

3—1 電流互感器之構成部份	49
3—2 鉄芯	49
3—3 線捲	51
1. 副級繞組	51
2. 原級繞組	51
3—4 線端之出線裝置	52
3—5 油箱	52
3—6 電流互感器之種類	54
1. 單匝貫穿式電流互感器	54
2. 瓷絕緣式電流互感器	56
3. 特高電壓之電流互感器	58
4. 補償式電流互感器	59
(1) 分數補償線捲	59
(2) 具有分路回路之電流互感器	59

第四章 電流互感器之設計

4—1 材料之選用對於電流互感器特性之影響	62
4—2 鉄芯之選定	64
1. 矩形之鉄芯截面	65
2. 正方形之鉄芯截面	66
3. 十字形之鉄芯截面	67
4. 環形鉄芯	68
4—3 線捲之決定與排列	68
1. 線捲之決定	68

2. 線捲之排列	69
(1) 空間因數	69
(2) 線捲排列	70
(3) 繞組之銅重及其電阻	70
4—4 鉄芯之計算	73
1. 鉄芯之體積	73
2. 鉄芯之重量	73
4—5 運轉特性	73
1. I_m 及 I_w 之示式	73
(1) $B-H$ (或 $B-w_m$) 及 $B-w_c$ 曲線	74
(2) $B-VA$ 及 $B-\cos\phi$ 曲線	77
(3) 由有功及無功安培匝數求得 I_c	79
2. K_c 與 β 之計算	79
3. 補償線捲	81
4—6 過負載特性之計算	81
4—7 設計程序之總結	84
1. 多匝電流互感器之設計程序	84
(1) 鉄芯之選定	84
(2) 副級繞組之排列	86
(3) 原級繞組之排列	87
(4) 鉄芯之計算	88
(5) 運轉特性	89
(6) 過電流特性 計算	89
2. 單匝貫穿式電流互感器之設計程序	93
(1) 鉄芯之選定	93
(2) 副級繞組之排列	94

(3) 鉄芯之計算	94
(4) 運轉特性	95
(5) 過電流特性之計算	96

第五章 設計實例

5—1 例題一	98
5—2 例題二	107
5—3 例題三	113

第六章 試驗

6—1 試驗項目之分類	119
6—2 極性試驗	119
1. 直流試驗法	119
2. 用標準互感器之差結比較法	119
3. 無標準互感器之差結法	119
6—3 絕緣電阻試驗	120
6—4 耐壓試驗	121
6—5 溫升試驗	121
6—6 開路試驗	122
6—7 熱穩定與動穩定試驗	122
6—8 比差與角差試驗	122
1. 間接法	123
2. 絕對法	125
(1) 兩瓦特計指示法	125
(2) 電阻平衡法	127
3. 相對法	129
(1) 兩瓦特計互換法	129
(2) 零示電橋法	130

第一章

緒 論

1-1 儀用互感器之應用

由發電廠所產生之多相交流電能，藉輸配電系統而將其輸送至各用戶。電能之供應猶如商品之銷售，必須藉各種儀器以達到量度上之目的。在交流制中，電流互感器與電壓互感器（統稱為儀用互感器）成為現代量電上不可缺少之儀器，無論安培計、伏特計或瓦特小時計等，由於技術上與經濟上之關係，在製造方面往往不能符合現代高電壓與高電流電路上之要求。故利用電流互感器及電壓互感器，可以將電路內之電流或電壓縮小至所要求之數值；然後再以低電流或低電壓之儀表度量之。

現代電氣之發展日新月異，控制與保護系統皆日趨複雜，靈敏度極高之繼電器成為控制或保護系統中極重要之原件。故利用儀用互感器縮小電路上的高電流或高電壓，用以達到操作繼電器之目的，亦為十分重要。

儀用互感器按其量度之對象可分為電流互感器與電壓互感器兩種。本書所敘述之範圍祇限於電流互感器。電流互感器又稱為串聯變流器；其結線圖如圖 1-1 (a) 所示。

互感器與瓦特計連在一起的應用如圖 1-1 (c) 所示。

綜合以上所述，電流互感器用於度量上，能將高電流縮小至便於量度之數值；用在控制線路時，可以操作繼電器以達到保護或控制上之要求，同時可以減輕開關台內聯接粗線之麻煩。

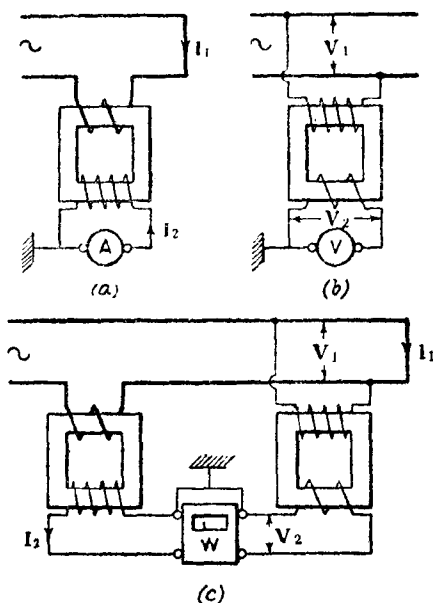


圖 1-1 儀用互感器之結線圖

1-2 儀用互感器與變壓器之比較

1. 變壓器之原理

(1) 空載電壓圖

圖 1-2 表示在鐵芯兩柱上繞着原級與副級兩組線捲之變壓器。當副級線捲開路，而以一交流電壓加於原級線捲 I 之兩端時，在原級線捲內即產生一交變電流 I_0 ；由此電流而產生一磁通 Φ_m 。我們稱 I_0 為空載電流，它滯後於端電壓 V_1 一相位角 φ_0 。 $V_1 I_0 \cos \varphi_0$ 之乘積為由電源所供給之電能；此一部份電能包括變壓器之鐵損失與線捲內一小量之銅損失。由於銅損失極小之緣故，故 $I_0 \cos \varphi_0$ 約等於鐵損失 P_w 之電流 I_w 。因為整個磁回路幾乎全部由鐵所組成，其中空氣隙祇佔極小部份，故僅需極小之激磁電流用以產生此磁通量 Φ_m 。磁通量與電流在磁路與電路內

各以相同的週率變化，因此線捲 I 內即產生一自感電勢。因為在鐵芯內之磁通為交變的，故即有鐵損失 P_w 產生。此自感電勢與線捲內電壓降之幾何和，應當與端電壓相平衡。

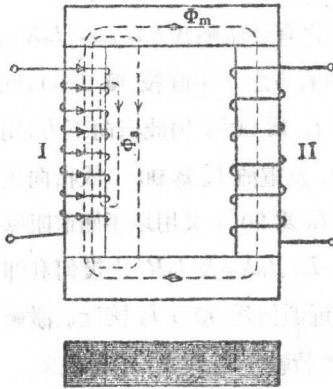


圖 1-2 單相變壓器之構成原理

在磁回路內磁通可分為兩部份：由線捲 I 所產生之磁通 Φ_m 係在鐵芯內通過；另一小部份磁通 Φ_l 在空氣中通過。 Φ_l 與 Φ_m 成平行方向（圖 1-2）。因為空氣之磁導係數 $\mu=1$ ，故在空氣部份之磁通與電流成正比。磁通 Φ_m 與電流之關係，係根據磁化曲線之特性而定。在空氣部份之磁通，我們稱之為漏磁通 Φ_l ；在鐵芯部份的磁通，同時通過線捲 II ，稱之為主磁通 Φ_m 。自感電勢係由主磁通 Φ_m 所產生的電勢 E_1 與漏磁通 Φ_l 所產生之電勢 E_l 之合成電勢。因此 E_1 、 E_l 與線捲本身之電壓降三種電勢之幾何和，應平衡於電源端電壓 V_1 。在磁回路中祇有主磁通 Φ_m 可將原級線捲之電能傳輸至副級線捲上，此磁通是為有用之磁通；而漏磁通 Φ_l 不能用以傳輸電能，稱之為無用磁通。因此祇有 E_1 為有用電勢，而漏磁通所產生電勢 E_l 為無用的。三種電勢的關係示於圖 1-3。

主磁通 Φ_m 在線捲 I 中感應電勢 E_1 ，滯後於 Φ_m 90° ；而主磁通 Φ_m 係由與其同相位之電流 I_m 而產生，故 I_m 稱之為激磁

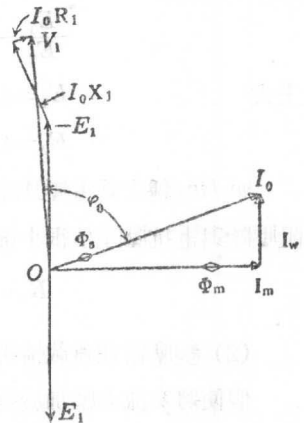


圖 1-3 無載向量圖

電流的無功分量，導前於 E_1 為 90° ，並與 Φ_m 成正比例。加在變壓器原級線捲上之端電壓，其中一小部份須用以平衡和 I_0 同相位之電阻壓降 $I_0 R_1$ 以及和電流 I_0 導前 90° 之電抗壓降 $I_0 X_1$ 。

假使 I_0 為空載電流， L_{11} 為原級線捲內漏磁通 Φ_{11} 之自感係數，又 $\omega = 2\pi f$ ，式中 f 為電源電壓之週率；則漏磁電勢之有效值應為 $I_0 L_{11} \omega = I_0 X_1$ 。

設將激磁電流之無功分量 I_m 作為指向右方之水平直線（圖 1-3），則主磁通 Φ_m 與 I_m 為同相位；電勢 E_1 移後於 I_m 為 90° ，因此指向下方；用以平衡 E_1 之電壓為 $-E_1$ ，越前於磁通量 Φ_m 及電流 I_m 為 90° ，故指向上方；漏磁通所感應電勢 $I_0 X_1$ 垂直並越前於 I_0 為 90° ；又用以平衡電阻壓降之 $I_0 R_1$ 與電流 I_0 為同相位；此三種電勢 $-E_1$ 、 $I_0 X_1$ 及 $I_0 R_1$ 之幾何和即為原級線捲之端電壓。 V_1 與 I_0 之相位移近似值為 90° ； I_0 接近於激磁電流。由圖 1-3 我們亦可見到 $I_0 R_1$ 及 $I_0 X_1$ 皆較 $-E_1$ 與 V_1 小得很多。

假使副級線捲處於開路的情況下，令主磁通在鐵芯內變化並通過副級線捲而感應一電勢 E_2 ，因為在原級與副級線捲中之週率完全相同，故在兩線捲內之感應電勢與其圈數成正比 即：

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = K_v \dots\dots\dots(1-1)$$

上式 $E_1 = 4.44 f w_1 \Phi_m \times 10^{-8} \dots\dots\dots(1-2)$

$$E_2 = 4.44 f w_2 \Phi_m \times 10^{-8} \dots\dots\dots(1-3)$$

w_1/w_2 稱之為電壓比率。因為空載電流十分小，所以在空載時之電阻壓降與電抗壓降佔很小部份，故 $E_1 \doteq V_1$ ，因此電壓比率可定為：

$$K_v = \frac{w_1}{w_2} \doteq \frac{V_1}{V_2} \dots\dots\dots(1-4)$$

(2) 變壓器在負載情況下之特性

假使將交流電壓加於變壓器之原級側，並在副級回路內接入一電阻器，則有一電流 I_2 在此副級電路內流動。如果不考慮變壓器之損失，輸入