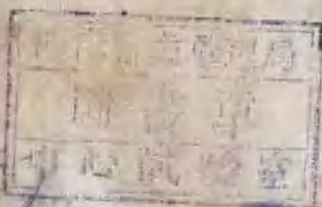


4383

開闢設計原理

王子平編譯



龍門聯合書局出版

0003877

TM5

A016

開關設計原理

Kesselring 著

王子平譯

龍門聯合書局出版

譯 序

在以往國內學電工製造者，多偏重於電機及變壓器等，而於開關方面却很少有人問津，以致造成有關這方面的知識及技術人員都極度缺乏。

新中國建設伊始，這方面的需要自不待言，我們必須很快的把上述情況扭轉過來。

本書原作者為德國 Fritz Kesselring，其內容偏重於開關設計基礎理論之闡述，於讀者或有一定的幫助

譯誤之處，請不吝指正。

王子平

目 錄

第一章	開關現象.....	1
第二章	導體之設計.....	20
第三章	閃絡與擊穿.....	47
第四章	開關之定額.....	68
第五章	開關設備之運動學.....	82
第六章	輔助器械之設計.....	93

第一章 開關現象

在設計任何電器之前，對於線路之啓閉以及故障所引起之各種現象，均應有充分之瞭解。欲研究一開關之作用，則必須洞悉線路之電壓、電流、電阻、電感、電容、激磁以及有關機械之特性等。

線路中之情況，可劃分為兩個階段：

(1) 穩定時期 當電流之大小為常數，或隨時間呈週期性變化時。

(2) 瞬變時期 當電路有啓閉，或有突然之變化時。

瞬變時期之發生，係介於線路之最初和最終穩定時期之間，係由於線路之啓閉、短路、調節電阻、變動電機勵磁，以及容電器放電等現象所引起。

引起這種變化之器械，可概括分為下述兩類：

(a) 線路啓閉所用之開關等：如刀形開關、接觸器、油開關等。

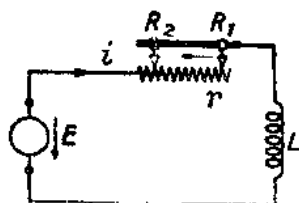
(b) 調節電流大小所用之調節設備等：如電阻、啓動器、電池開關等。

直流線路

假如吾人研究調節一可變之電阻，則知其最後之變化，需要看電阻之調節如何。在一定時間內，可以使電阻由 R_1 逐漸變為一較小的 R_2 。但是，也可使此變化，在一極短時間內，利用一支開關使其完成。此啓閉時間之久暫，可利用曲線或數學方法表明之，此即

下面將要談到之開關函數。

於瞬變時期之末端，接着就可能有很多的最終穩定情況，故一



第1圖

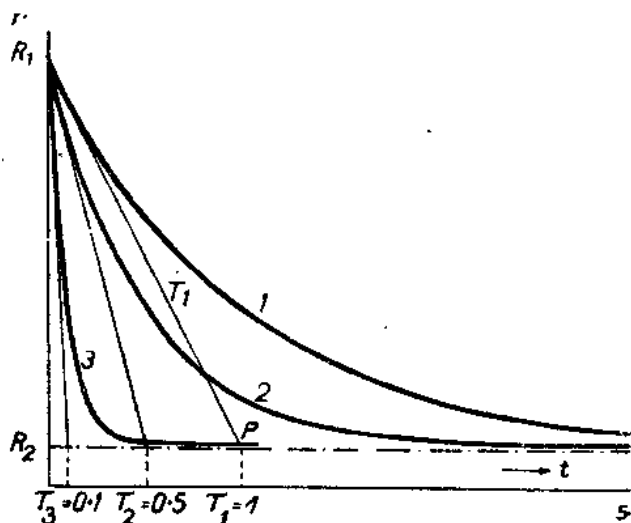
支啓閉器，必須能針對某些情況，而起應有之作用。茲舉例說明之。

如第1圖，其中有一直流電機，一可變電阻 R ，一固定電感 L 。當 $t=0$ ，電阻 R 係完全劃在電路以內。然後令

電阻隨時間按指數大小關係而遞減。即

$$r = R_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + R_2 \dots\dots\dots (1)$$

此如第2圖曲線(1)所示。以此表示實際情況極恰當。設吾人對此曲線之幾何特性已經熟悉，則可於 R_1 處作一切線和 t -軸相



第2圖

交。此交點所表示之時間 t ，即謂之此線路之“時間常數”。第(1)式亦即所謂之在已知條件下之開關函數。

在這段時間，電阻減去了 $(R_1 - R_2)(1 - \frac{1}{e})$ ，尚餘有 $(R_1 - R_2)\frac{1}{e}$ ，其中 $e = 2.718$ ，第2圖中之曲線 2、3 分別代表當 $\tau = 0.5$ ，和 0.1 時之情形。

當電阻逐漸減小，電流即逐漸增加，結果電機之端電壓變低。關於電壓與電流間之關係，如果吾人表之以曲線，則即成所謂之電機特性曲線也(參閱第3圖)。關於尋求電流隨時間變化之情形，用下述方法即可很易於求得。在啓閉前後之穩定電流 I_1 與 I_2 。吾人熟知，端電壓必須等於 iR 降落，故

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= I_1 R_1 \\ E_2 &= I_2 R_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

利用 iR_1 及 iR_2 之值，即可求得斜線 g_1, g_2 分別與 i -軸成 α_1 及 α_2 之夾角，故

$$\tan \alpha_1 = \frac{E_1}{I_1} = R_1$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{E_2}{I_2} = R_2$$

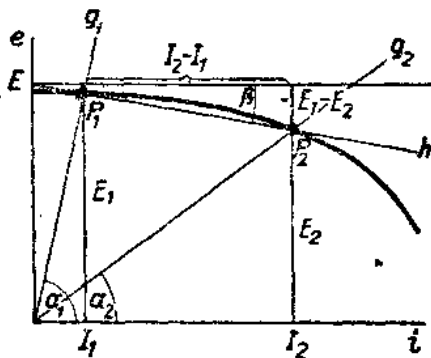
斜線 g_1, g_2 復分別與曲線 $e = f(i)$ 相交於 P_1, P_2 兩點。

必須用數學關係將端電壓及電流間之關係表出以後，方可計算開關函數。例如在前例中(參閱第3圖)，端電壓由 E_1 變為 E_2 ，其變化情形由斜線 h 即可察得。因端電壓之變化係電流之函數，故吾人可寫作

$$e = E - i \tan \beta$$

其中

$$\tan \beta = \frac{E_1 - E_2}{I_2 - I_1} \dots\dots\dots (3)$$



第3圖

不過此式之存在必須合乎以下諸條件：

(1) $e-i$ 特性曲線必須適用於 I_1, I_2 。當有電弧時，此條件即不適合，故動態和靜態必須首先分清楚。

(2) 負載電流決不能大過 I_2 。

在此二條件下，線路之微分方程式便可寫作

$$e = ri + L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

將(4)代入(3)，得

$$E - i \tan \beta = \left[R_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + R_2 \right] i + L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

$\tan \beta$ 包含有發電機內阻之降落和電樞反作用之降落，如設 $R_g = \tan \beta$ 。電機之感應電勢為 E ，則端電壓即為

$$e = E - iR_g$$

不過此結果尚有一限制條件，即電流不能大於 I_2 （參閱第3圖）。假如大於 I_2 ，則斜線 h 即不能相應於 e 之特性曲線。 R_0 之值若代入式(5)則得

$$L \frac{di}{dt} = E - \left[R_0 + R_2 + R_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \right] i \dots\dots\dots (6)$$

由之，吾人得知電流之變化率 $\frac{di}{dt}$ ，在任何時刻如乘以 L 即等於上式之右端。然因 i 之係數是時間 t 之函數，並非常數，故此微分方程式之解並不簡單。假設開關函數中之時間常數 τ 減小時，則 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 即隨之而變小。例如 $\tau = \frac{1}{1000}$ 秒， $t = \frac{1}{100}$ 秒則 $e^{-10} = 0.000045$ 。此即充分說明，假如時間 $t > \frac{1}{100}$ 秒時，則 $R_1 e^{-\frac{t}{\tau}}$ 實際上即可看做是零。因之吾人可把上述之方程式改為

$$L \frac{di}{dt} = E - (R_0 + R_2) i \dots\dots\dots (7)$$

此式之係數為常數，故其解可極易求得之。

設式(6)之 τ 趨近於零，則式(7)即頗適用於當 t 值很小之情況。依據數學原理，電流 i 之變化應該能用一 i 、 t 、 τ 之函數表示之。即

$$\frac{di}{dt} = f(i, t, \tau).$$

微分中曾有一很重要之定理，就是說假如一微分式之右端為 i 、 t 、 τ 三數之定函數，則其解（在吾人現在之情況下為電流 i 當隨參數 τ 而變。換言之，當 $\tau = 0$ 時 i 將趨近於一極限值）。 $\tau = 0$ ，亦就是說在短路時電阻 r 由 R_1 變成了 R_2 。利用這種方法來計算開

關函數，在數學上之方便處是係數為常數，易於求解。實際上，開關函數也不可能為極度短的時間。一般言之在固定時間內，式(7)是足夠正確了。惟獨有了上述之條件，限制此式將不能適用於所有一般之情況。令 $R = R_1 + R_2$ ，代入(7)則得

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E \dots\dots\dots (7a)$$

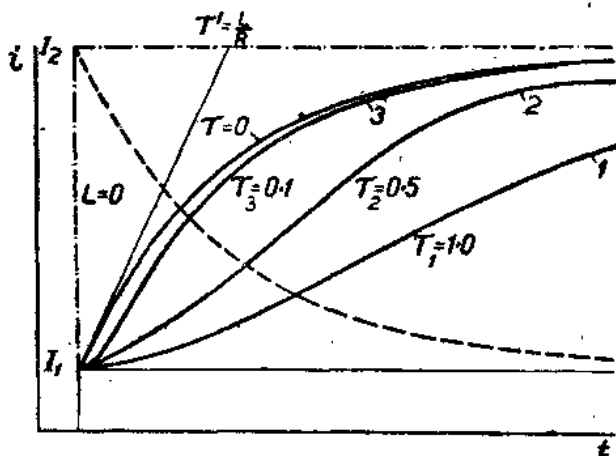
此方程式之解為

$$i = i_f (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \dots\dots\dots (8)$$

i_f = 瞬變電流之最終值。由圖(4)知如 I_1 為 $t=0$ 時之最初電流值，且 $i_f = I_2 - I_1$ ，

則
$$i = I_1 + (I_2 - I_1)(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

或
$$i = I_2 + (I_1 - I_2)e^{-\frac{R}{L}t} \dots\dots\dots (9)$$



第4圖

假如當 $t=0$ 時, $r=\infty$, 亦即線路為中斷情況, 然後再猛然將線路連通, 則式(9)中之 $I_1=0$ 。所以上式簡化為

$$i = I_2(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \dots \dots \dots (9a)$$

第4圖之電流曲線, 即係依據(9)式當 $\tau=0$ 時畫出的。另外之三條曲線, 分別為 $\tau=0.1, 0.5, 1$ 。 $\tau = \frac{L}{R}$, 其中 $R=R_1+R_2$ 。當 τ 逐漸減小, 則曲線1即將逐漸向曲線(2), 曲線(3)轉移, 直到最後之極限位置 $\tau=0$ 時, 如圖中和 i -軸平行之曲線所示。然在實際之情況下, 線路中之 L 絕不等於零。故也絕不可能形成極限位置也。假如令 r 很快地由 R_2 增加到 R_1 (與線路之時間常數 τ 相較), 則電流之變化情形即如圖中虛線所示。用式表示之為

$$i = I_1 + (I_2 - I_1)e^{-\frac{R}{L}t} \dots \dots \dots (10)$$

當電流逐漸減小時, 當然也可以作出許多類似之曲線。

當 τ 由小逐漸變大, 曲線即逐漸靠近於水平軸。

第5圖中所示, 皆係應用中極重要之幾種啓閉情況。在繼續討論以前, 尚須假設線路之啓閉非常快。換言之, 即 τ 非常小之條件下。

容電器經電阻放電

參閱第5圖(a), 容電器之端電壓為 e_0 , 放電電流為 i , 其大小均以指數大小關係而遞減。放電愈快, 則 $\tau=RC$ 愈小。最初電流 $I = \frac{E_0}{R}$ 。

容電器經電阻充電 (參閱第5圖b)

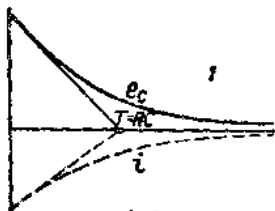
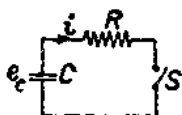
將圖a之容電器反向充電, 其端電壓 e_0 則為

$$e_c = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

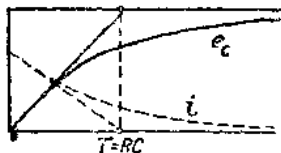
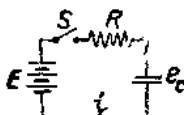
當 $t = \infty$, 則 $e_c = E$ 。

交流線路之啓閉 (參閱第5圖c)

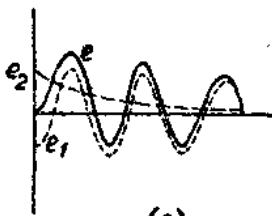
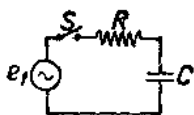
加一穩定電壓 e_1 於一按指數大小關係而減低之電壓 e_2 上, 結果電壓為 e 。 e 之最大值決定於開關閉合的時間, 當電壓 e 為極大值之際, 閉合開關, 則最為危險。



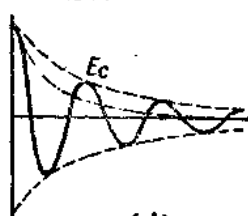
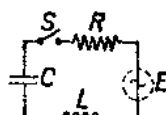
(a)



(b)



(c)



(d)

第5圖

逐漸降落之電壓 e_2 ，其最初值即為開關閉合時，其波形上的大小。自第5圖(c)之各曲線，即可瞭然電壓波形前後之變化情況，設於電壓為極大值時閉合，則二觸點於臨近時，電弧遂即產生。故開關之閉合，最好不要在電壓為極大 $e = E$ 之際。反之，如於電壓 $e = 0$ 時閉合，則電壓上升即等於零矣。從同一圖中吾人尚知，如串入一容電器，則於其兩端附近，即可產生約略兩倍於原電壓之高壓。若將容電器取去，以另一電感器代換之，當電壓和零值相近時閉合，則亦有瞬變情況產生，因此時磁場却為極大。反之，若於電壓為極大值時閉合，因此時磁場為零，故無瞬變情形。在閉合輕負載變壓器線路時，此兩種情況均極重要。由於磁飽和關係，電流峰值往往較高，有時幾達十倍於滿載電流。限制此種衝流之方法，有時有利用充電電阻者。

諧振

第5圖(d)係一諧振電路。有電阻、電容及電感。設電容 C 經充電後，電壓為 E 時，將開關 S 閉合，電路中途有電流產生。此電流不僅在電感 L 建立一磁場，同時在電阻 R 尚有 $i^2 R$ 之耗損。所以原蓄於電容之能量，部份即化為熱能而消失矣。假如在此等電路中電阻 $R = 0$ ，則能量即將往返轉變於電路中，永無休止。當蓄於靜電場之能量 $e^2 \frac{C}{2}$ 放出時，因有電流之產生，最後遂有 $i^2 \frac{L}{2}$ 之能量轉蓄於磁場。一俟磁場完全建立， $i^2 \frac{L}{2}$ 復返轉放出，回於電容 C 中。如此往復振盪，其週率為一定值，稱謂諧振線路之自然週率。當電阻 $R = 0$ ，此週率為：

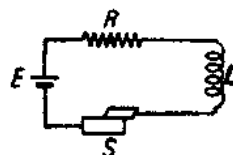
$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

然於實際情形下，線路因有電阻關係， $R \neq 0$ ，多一電阻耗損，所以起初蓄於容電器中之能量於若干時間後即可全部化為熱而耗去，故其振幅遂逐漸減低。實際上假如於第5圖(d)之線路，引入一A.C. 電源，設其週率正等於自然週率，則因能量之振幅，僅僅受限於電阻；故於電阻很小時，電壓電流均將很大。力學上之單擺，假如所加推力和其自然週率正相吻合時，即為一類似之情形。

斷路

一直流線路斷開之情形可參閱第6圖，其開關 S 係相互壓緊之二平板，可以滑動。故斷路時尚需要一定時間，兩板方可完全分開。如此裝置之原因，係基於下述之事實：

(1) 假如開關突然開啓，於理論上講，將有一無限大之電壓產生。



第6圖

(2) 突然之斷路並不合乎實際事實，因為在通常斷路時，接觸處往往有電弧產生，故電流係逐漸消滅。

令 G_0 為兩平板接觸面最大時之電導， t 為自開始滑動起的時間， T 為兩板完全分開所需之時間。

則在時間 t 的電導為：

$$g = G_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right)$$

其倒數則為電阻

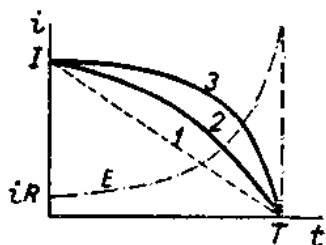
$$r = \frac{R_0 T}{T - t} \dots\dots\dots (11)$$

此方程式亦係開關函數之另一表示。設電路如無電感，按歐

姆定律知，在整個時間 T 中，電流 i 之變化為 t 之直線函數。

此如第 7 圖中直線 (1) 所示。設電路中如有一定值之電感 L ，則電流 i 情形即如第 7 圖中之曲線 (2)、(3) 所示，解第 6 圖線路之微分方程式，則知假如

$$\frac{R_0 T}{L} > 1 \dots \dots \dots (12)$$



第 7 圖

於斷路時方無電弧產生。

開關觸點間之電壓 e ，於 $t=T$ 時，亦即二板形將分開之際，為

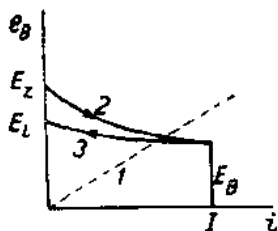
$$\left. \begin{aligned} e_{t=T} &= \frac{E}{1 - \frac{R_0 T}{L}}, & \text{當 } \frac{R_0 T}{L} > 1 \\ e_{t=T} &= \infty, & \text{當 } \frac{R_0 T}{L} < 1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

故知祇有在 $\frac{R_0 T}{L} > 1$ 條件下， $e_{t=T}$ 方為有限值。此結論對滑動接觸型之開關如集流器及調整器等均極重要。必須遵循此條件，以免發生電弧。但對一般開關設備而言，此點誠不易作到，故由之而生的電弧，勢將延長斷路時間，直到電流中斷為止。

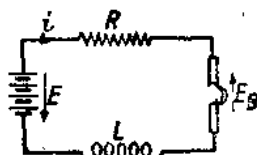
直流電弧現象

電弧之產生，電極間必須有足夠發生閃絡的電壓 e_s 。由於在較高溫度下電極間游離度之增加，電弧電阻遂逐漸減少，而電流却逐漸增加。此外電弧尚有一特性，即電壓雖然降低，但電流却反而增加。如減小電流，游離度隨而降低，電阻增高，直到電流通過零點時，電弧即告熄滅。電弧熄滅之際，電極間之剩餘電壓稱謂熄滅

電壓 e_1 。一般 e_2 大於 e_1 ，第 8 圖曲線 1 所示，係在電阻為常數之電路中 $e-i$ 特性曲線。曲線 2 所示，為一定長之電弧，增加電流時之 $e-i$ 情形，曲線 3 為減小電流時之情形，其中之最大電流值 I 即相當於電弧電壓最小時之電流值。



第 8 圖



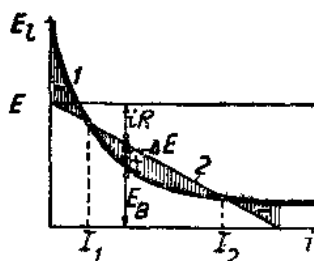
第 9 圖

繪於第 9 圖中之電路包括一直流電源，電壓為 e ，電阻為 R ，電感為 L ，電弧電壓為 e_B ，此電路之電動勢方程式可以寫作

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + e_B$$

可變為

$$L \frac{di}{dt} = (e - Ri) - e_B = \Delta e \dots \dots \dots (14)$$



第 10 圖

電弧熄滅之際，電流為零，故 $\frac{di}{dt}$ 必須為負。第 10 圖之曲線 1 即係代表當電流減低時電弧之情形，曲線 2 為 $e - iR$ 之差，其與 e_B 相減，從 (14) 式知所得即為 Δe ，如圖示 Δe 可正可負。因電流如小於 I_1 ，電弧即有熄

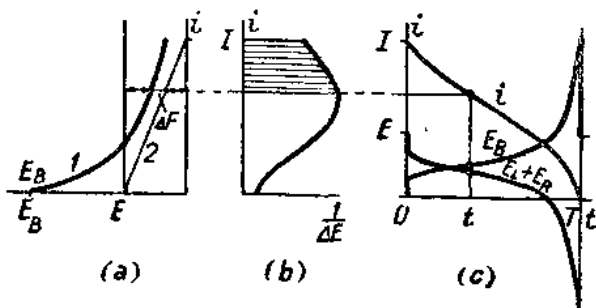
滅可能，故 I_2 右邊負的部份極不穩定。欲使一開關能很好的完成切斷電路任務，就必須使電弧特性曲線（如曲線 1）位於電阻線之上（如曲線 2）。所以通常，開關多備有特殊裝置以增加弧長。因弧長增加後使特性曲線上揚，可以不再與電阻線相交。故增加弧長對空斷開關而言，是極端必要的。

解(14)式中 dt ，得

$$dt = \frac{L}{\Delta e} di \dots\dots\dots (15)$$

$$\therefore t = L \int \frac{1}{\Delta e} di \dots\dots\dots (16)$$

此式極易用圖表出之。第 11 圖 (a) 中曲線 1 係表示一電流逐漸降落之電弧特性曲線。曲線 (2) 為電路之電阻線。



第 11 圖

設 e_i 為開關之熄滅電壓，則可仿第 10 圖方法，可從第 11 圖 (a) 中求出 Δe 。對(16)式積分，如第 11 圖 (b) 畫出 I 與 $\frac{1}{\Delta e}$ 之面積，其中 I 為電路中之最初電流。電流 i 隨時間變化之情形如第 11 圖 (c) 所示，其中同時尚有電弧電壓 e_B 之變化情況。($e - e_B$) 應