

昭和十二年一月二十五日發行

論 說

電氣弧光爐の電氣的特性に就て

(日本鐵鋼協會第 16 回講演大會前刷)

林 達 夫*
野 田 浩*

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC ARC FURNACE.

Tatsuo Hayashi and Hiroshi Noda

SYNOPSIS:—The author mentioned about the necessity of investigation of electrical characteristics of electric arc furnace as one of the most important factors concerning electric furnace, which contains many engineering problems, say, thermal, metallurgical, mechanical and electrical department.

To consider this electrical characteristics author illustrated several simple practice and approximate formulae with a practical example comparing with both results from the preliminary calculation and the actual short circuit test of a complete furnace.

内 容 目 次

- I. 緒 言
- II. 電氣的特性の諸關係
- III. 實 例
- IV. 結 言

参 考 文 献

I. 緒 言

電氣弧光爐が工業上特異の位置に在り工學各部門に關聯する一つの綜合的研究の對象であることは今更述べる迄もない。今電氣的特性を考へる場合にも單に電氣工學上の關係のみでは不充分であつて、これと密接な關係にある熱學冶金學、機械工學上の諸條件、相互關係を考慮して始めて爐の電氣的特性の意義がある。電氣的特性の如何は爐に直接多大の影響を及し種々の經濟的操業條件を左右するに止らず、甚しきに至つては鑄解作業の能不能といふ死活問題にも關する。従つて電氣弧光爐の設計、製作及び操業に際し優秀なる性能と良好なる成績を得るためには是非この電氣的特性を實際問題として研究する必要があり、單なる理

論上の問題として輕視さるべき事柄ではない。然るにこの重要なる問題が一般には等閑に附されてゐる事が多いのは洵に遺憾であり、これを無視した弧光爐製作者を往々にして見受ける事は寒心に堪へない。

電氣的特性といふ内には電氣回路特性、電弧特性、電氣化學的特性等の問題を包括してゐるが、此處に述べんとするのは主として電氣回路の特性である。この場合にも他の諸條件との相互關係を常に考慮に入れるべき事は勿論であるが、一般電氣機械とは趣を異にし特に設計製作に際して量的取扱が困難である。その理由は種々あるが先づ考へられる事は對象たる電氣弧光爐の使用條件が複雑であり、使用される電流も數千乃至數萬アムペア程度以上の大電流であり精密なる計算の基礎が薄弱で測定、研究等にも種々の不便がある事である。同時に又數値計算が比較的面倒な熱、冶金等の問題と複雑な關係のある事も大きい原因である。然しながら近年諸外國に於ては電氣弧光爐を對象として漸次この問題も研究されつゝあり、電氣弧光爐の進歩發展の一つの基礎となつてゐる事は事實の證明する處である。

最近本邦としては先づ大容量の部類に屬する電氣弧光爐の設置に關し、筆者は前以て諸特性を豫定し、その内の電

* 大同電氣製鋼所

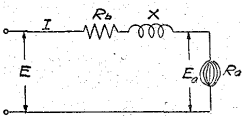
氣回路特性に就て比較的簡單なる公式及圖表により、過去の實績を參考にして設計々算を行ひ製作据付後更に現地に於て測定試験を施行しそれ等の結果を對照した。以下その概要を紹介する。

II. 電氣的特性の諸關係

現今使用されて居る電氣弧光爐の大部分は交流弧光爐であり、更にこの内でも三相三線式の對稱三相弧光爐が最も多數を占めて居る。以下述べる關係は主としてこの對稱三相弧光爐に就てであるが、相數、線數を異にし或は非對稱のものにも夫々適當な變換を行つて同様に適用する事が出来る。

1. 平衡三相弧光爐 對稱三相弧光爐で各相平衡して居る場合には各相は近似的に第1圖の如く考へ得る。即ち抵抗 R_a なる可變抵抗負荷の電弧が

第 1 圖



抗 R_a なる可變抵抗負荷の電弧が之と直列にある一定の抵抗 R_b 及びリアクタンス X を經て電壓 E なる電源に接続されて居る。弧光

爐では變壓器、リアクトル等が接続されるのが普通であるから R_b, X は之等の器具をも含めた全回路の定數である。又數值的取扱に於てはすべて一次側或は二次側何れか一方に換算した値を用ふべき事は勿論である。 R_b, X は嚴密には一定値ではなく、特に電流範圍が大で且各部の關係位置が爐操業狀態に應じて變化する場合には之等の値には多少の變動あることは事實であるが、爐全體としての電氣的特性の概略を求める上に於ては先づ一定値と見做して差支へない。靜電容量の影響も同様に無視してよい。

扱以上の R_a, R_b, X を基礎として電氣的特性に關係ある公式を求めると次の如くなる。

今 { 電源の無負荷電壓…………… E (V)
 爐電流(電弧電流)…………… I (A)

とすれば、

力 率 $\cos \theta = \sqrt{1 - (IX/E)^2}$ …………… (1)

完全短絡力率角 $\theta_s = \tan^{-1} X/R_b$ …………… (2)

完全短絡電流 $I_s(A) = (E/X) \cdot \sin \theta_s$ …………… (3)

爐 電 流 $I(A) = I_s \cdot \sin \theta / \sin \theta_s$ …………… (4)

電 弧 電 壓 $E_a(V) = E \cdot \sin(\theta_s - \theta) / \sin \theta_s$ …………… (5)

所 要 電 力 $P(kW) = 3 \cdot 10^{-3} (E^2/X) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$ …………… (6)

損 失 電 力 $L(kW) = 3 \cdot 10^{-3} (E^2/X) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cot \theta_s$ …………… (7)

電 弧 電 力 $Q(kW) = 3 \cdot 10^{-3} (E^2/X) \cdot \{\sin \theta \cdot \sin(\theta_s - \theta) / \sin \theta_s\}$ …………… (8)

電 弧 能 率 $\eta(\%) = 100 \cdot (1 - \tan \theta \cdot \cot \theta_s)$ …………… (9)

最大所要電力 $P_m(kW) = 3/2 \cdot 10^{-3} (E^2/X)$ …………… (10)

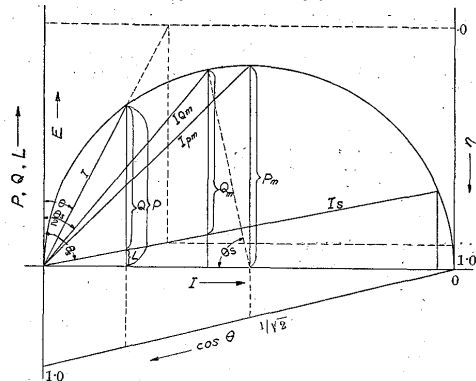
最大電弧電力 $Q_m(kW) = 3/2 \cdot 10^{-3} (E^2/X) \cdot \tan \theta_s/2$ …………… (11)

P_m を與へる電流 $I_{Pm}(kW) = 1/\sqrt{2} \cdot (E/X)$ …………… (12)

Q_m を與へる電流 $I_{Qm}(kW) = (E/X) \cdot \sin \theta_s/2$ …………… (13)

第2圖は之等の關係を示す圓線圖である。半圓周は電流ベクトルの軌跡で、その直徑は (E/X) に等しく、電流

第 2 圖



零なる無負荷狀態より完全短絡電流 (I_s) に至る迄の各電流値に應ずる諸電力、電壓、力率、電弧能率等を求め得る。

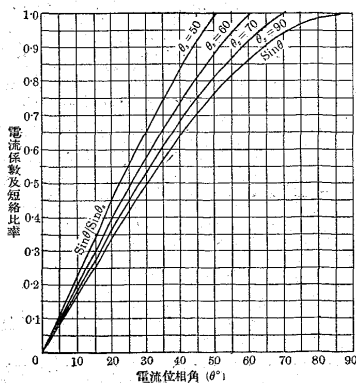
又公式(4)

乃至(9)を見るに、何れも三角函數の因數を有し、 $(E/X), (E^2/X)$ 等の簡單な數値以外は完全短絡力率角 θ_s をパラメーターとする三角函數である。そこで今、

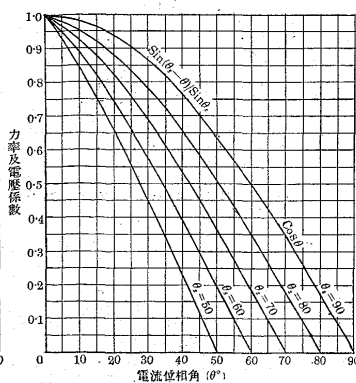
$\sin \theta =$ 電流係數

$\sin \theta / \sin \theta_s =$ 短絡比率

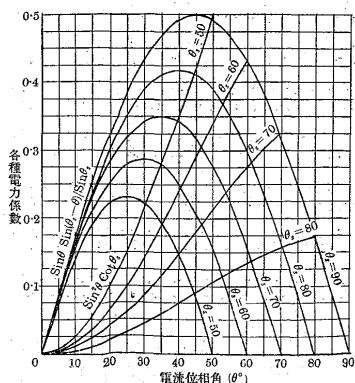
第 3 圖



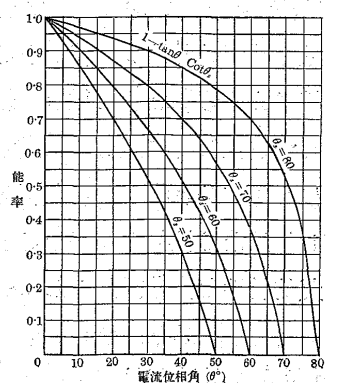
第 4 圖



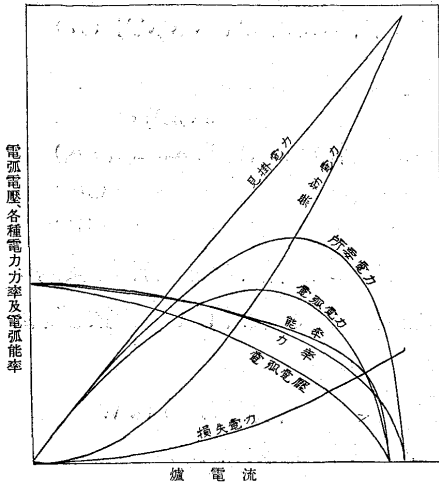
第 5 圖



第 6 圖



第7圖 電氣弧光爐特性曲線



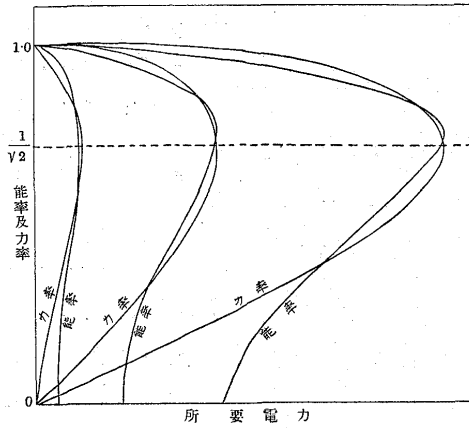
$\sin(\theta_s - \theta) / \sin \theta_s = \text{電壓係數}$
 $\sin \theta \cdot \cos \theta = \text{所要電力係數}$
 $\sin^2 \theta \cdot \cot \theta_s = \text{損失電力係數}$
 $\sin \theta \cdot \sin(\theta_s - \theta) / \sin \theta_s = \text{電弧電力係數}$
 $1 - \tan \theta \cdot \cot \theta_s = \text{電弧能率}$

と稱することとし、 θ_s をパラメーターとして電流位相角 θ と之等の係數との關係曲線を作ると第3圖乃至第6圖を得る。之等の圖は總ての交流弧光爐に共用する事が出來特に設計、計畫の目安とするには非常に便利である。

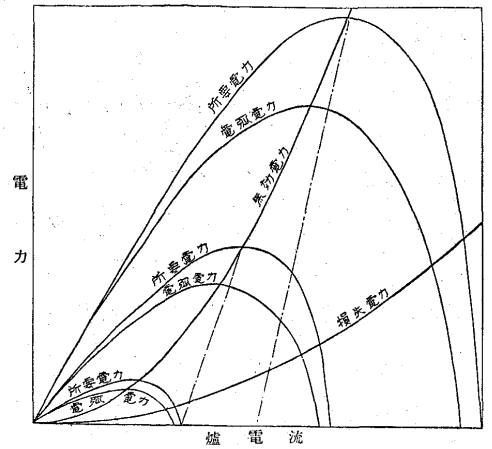
以上の方法で爐電流の各値に應ずる特性を求めて曲線を作れば第7圖の如き傾向となる。第8圖、第9圖は電壓が變化したる場合の特性曲線の比較を示す。之等の關係を對照吟味すれば種々の相互關係、經濟的條件等を類推する事が出来る。

以上に於ては變壓器の特性は特別に考慮してなく全體として取扱つた。更に詳細に研究せんとすれば、變壓器自身の特性が加るのは當然であるが、關係式は稍複雑となる。實際問題としても無負荷に近い状態に於る特性は兎も角、操業範圍に於ける特性には大した相違が無い。従つて概略の特性を求める場合には變壓器の勵磁電流等を考慮せる複雑な式よりも前述の如き簡単な方法による方が實用的である。然し變壓器の特性が如何なる影響を與へるものであるかを知悉して置く事は必要である。第10圖は變壓器を考慮した等價回路を、第11圖はこの場合のベクトル圖を示す。第10圖、第11圖より特性を求めるに必要な近似公式を作り、これから特性曲線を描けば第12圖の如き傾向となる。第12圖を前掲の第7圖と比較すれば、電流の僅少なる部分に於ては力率、電弧能率共に變壓器の影響

第8圖 電氣弧光爐特性曲線
(三種類の電壓に對する比較)

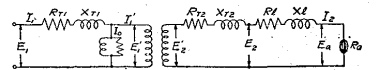


第9圖 電氣弧光爐特性曲線
(三種類の電壓に對する比較)



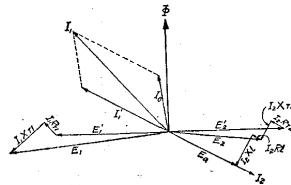
によりかなり相違があるが、夫以上の電流範圍では同様の傾向を示してゐる。

第10圖 電氣弧光爐の等價回路

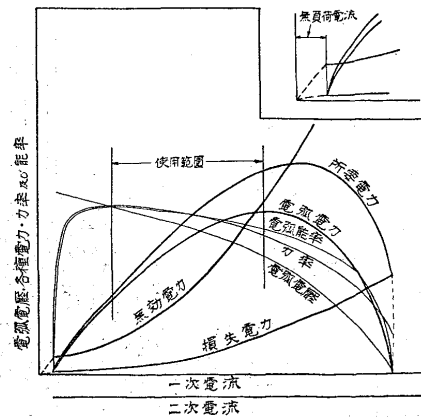


- R_{T1} = 變壓器一次抵抗
- R_{T2} = " 二次抵抗
- R_i = 二次母線抵抗
- R_a = 電弧抵抗
- E_1 = 一次誘起電壓
- E_2 = 二次端子電壓
- I_1 = 一次電流
- I_0 = 無負荷電流
- X_{T1} = 變壓器一次リアクタンス
- X_{T2} = " 二次リアクタンス
- X_i = 二次母線リアクタンス
- E_1 = 一次端子電壓
- E_2 = 二次誘起電壓
- E_a = 電弧電壓
- I_1 = 一次負荷電流
- I_2 = 爐電流

第11圖 電氣弧光爐
ベクトル圖



第12圖 電氣弧光爐特性曲線



2. 不平衡三相

弧光爐 對稱三相弧光爐は設計、製作に於て各相の定數を等しくしても負荷の性質上、使用状態に於て三相完全に平衡する事は稀である。爐業者は各相負荷の

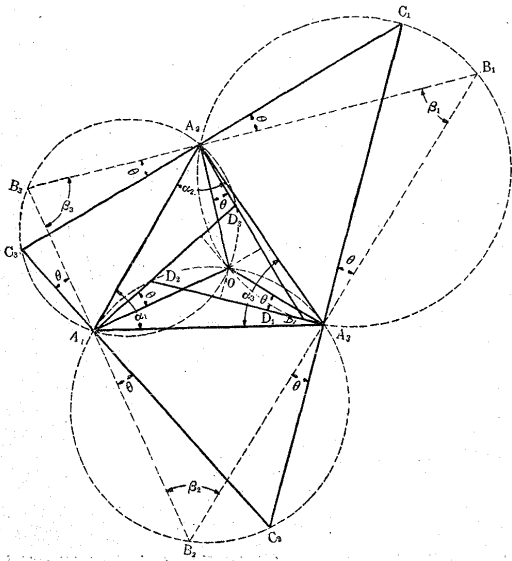
平衡を期すべき事は云ふ迄もないが、不平衡三相回路の性質を了解して置く事は製作者使用者孰れにとつても必要である。

今、各相不平衡電流…………… I_1, I_2, I_3 (A)

線間電壓…………… E_{23}, E_{31}, E_{12} (V)

とし、三相力率を $\cos \theta$ と假定する時、第13圖の如

第 13 圖



き作圖に依つて、三角形の面積から電力を求めることが出来る。 α, β は夫々電壓三角形、電流三角形の内角で作圖からも直接求まるが次式で計算することも出来る。

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_1 &= (E_{31}^2 + E_{12}^2 - E_{23}^2) / 2E_{31} \cdot E_{12} \\ \cos \alpha_2 &= (E_{12}^2 + E_{23}^2 - E_{31}^2) / 2E_{12} \cdot E_{23} \\ \cos \alpha_3 &= (E_{23}^2 + E_{31}^2 - E_{12}^2) / 2E_{23} \cdot E_{31} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta_1 &= (I_2^2 + I_3^2 - I_1^2) / 2I_2 I_3 \\ \cos \beta_2 &= (I_3^2 + I_1^2 - I_2^2) / 2I_3 I_1 \\ \cos \beta_3 &= (I_1^2 + I_2^2 - I_3^2) / 2I_1 I_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

又三角形の關係から次の關係がある。

皮相電力 $P_0(\text{kVA}) = 2k \cdot \Delta B_1 B_2 B_3 \dots\dots\dots (16)$

所要電力 $P(\text{kW}) = 2k \cdot \sqrt{\{(\Delta B_1 B_2 B_3) \cdot (\Delta C_1 C_2 C_3)\}} \dots\dots\dots (17)$

或は

$$P_0 = 10^{-3} \cdot \{(I_1 + I_2 + I_3) / \sin \beta_1 + \sin \beta_2 + \sin \beta_3\} \cdot \sqrt{\{E_{31} E_{12} \sin \beta_1 \sin(\alpha_1 + \beta_1) + E_{12} E_{23} \sin \beta_2 \sin(\alpha_2 + \beta_2) + E_{23} E_{31} \sin \beta_3 \sin(\alpha_3 + \beta_3)\}} \dots\dots\dots (16')$$

$$P = P_0 \cos \theta \dots\dots\dots (17')$$

上記の關係を用ひて、例へば電氣弧光爐の特性を實測の結果から求めんとする場合には次の如くにして定數を算出する事が出来る。

今、皮相電力 $P_0(\text{kVA})$ 所要電力 $P(\text{kW})$

電弧電力 $Q(\text{kW})$ (不完全短絡電力)

を得れば、

$$\text{無効電力 } P_x(\text{kW}) = \sqrt{(P_0^2 - P^2)} \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{完全短絡電位相角 } \theta_s = \tan^{-1} P_x / (P - Q) \dots\dots\dots (19)$$

回路の平均固定抵抗

$$R_b(\Omega) = \{(P - Q) / (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2)\} \cdot 10^3 \dots\dots\dots (20)$$

回路の平均固定リアクタンス

$$X(\Omega) = \{P_x / (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2)\} \cdot 10^3 \dots\dots\dots (21)$$

III. 實 例

前節に述べた諸關係を更に量的に示すため以下實例を擧げて説明する。

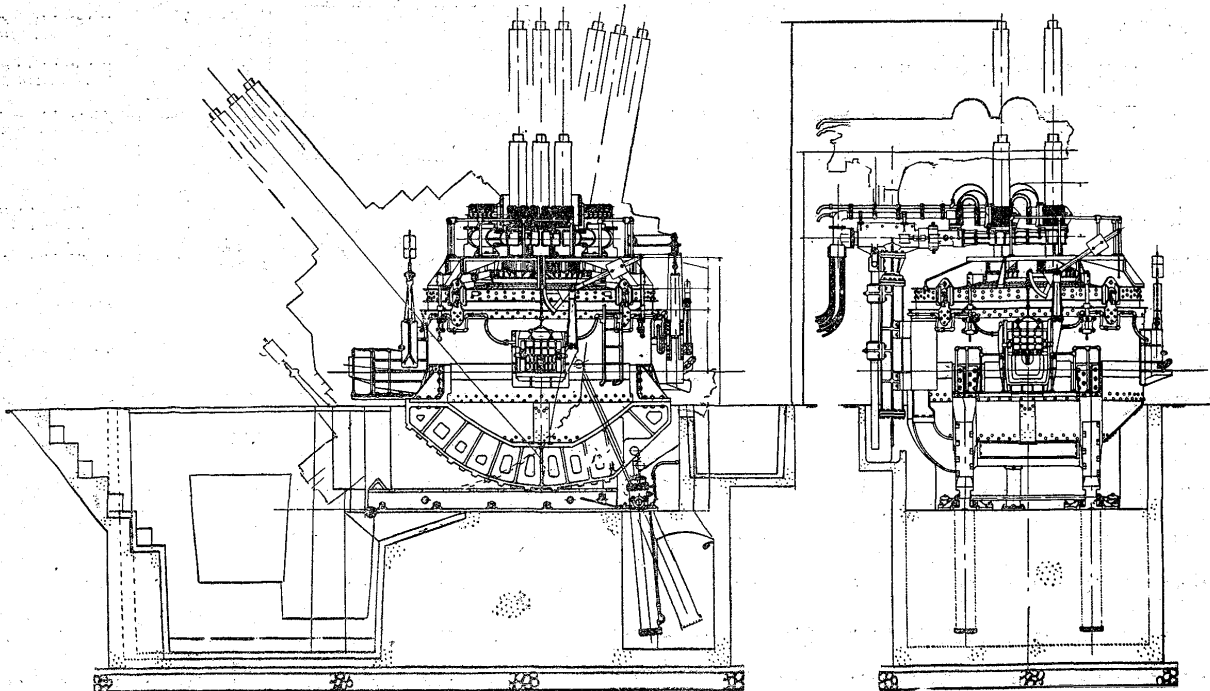
第 14 圖 電氣弧光爐組立圖 (其の1)

(株式會社大同電氣製鋼所)

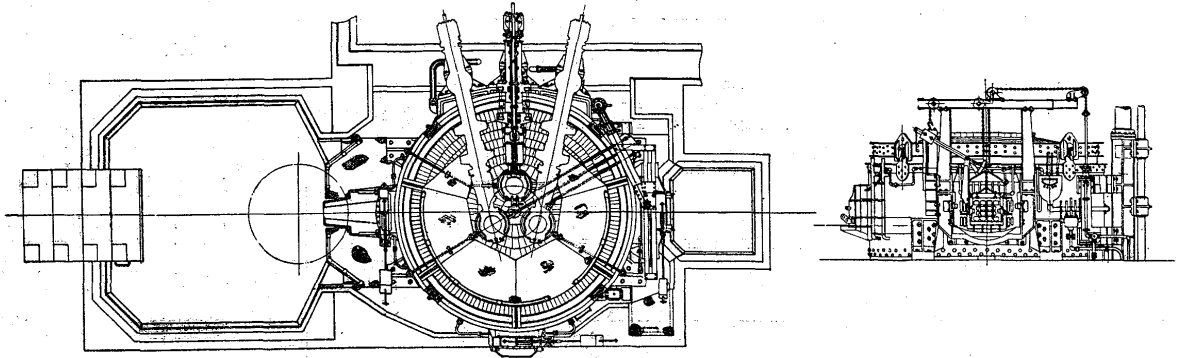
日本特許第 34,861 號
 " 第 87,156 號
 " 第 87,408 號
 " 第 100,605 號

日本特許第 114,167 號
 " 第 115,167 號
 " 第 115,869 號
 佛國特許第 780,099 號

英國特許第 445,351 號
 實用新案第 203,336 號
 " 第 221,648 號
 " 第 225,158 號

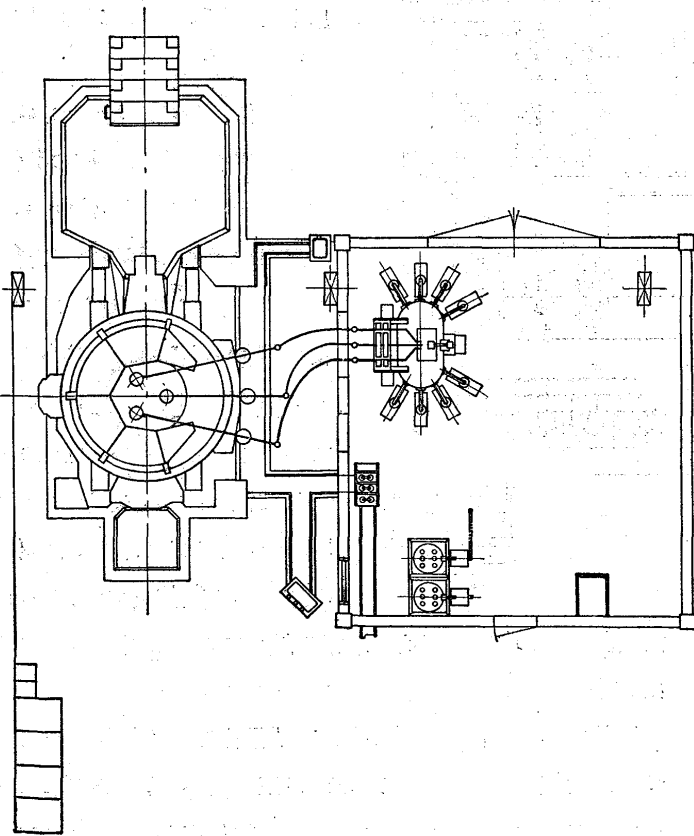
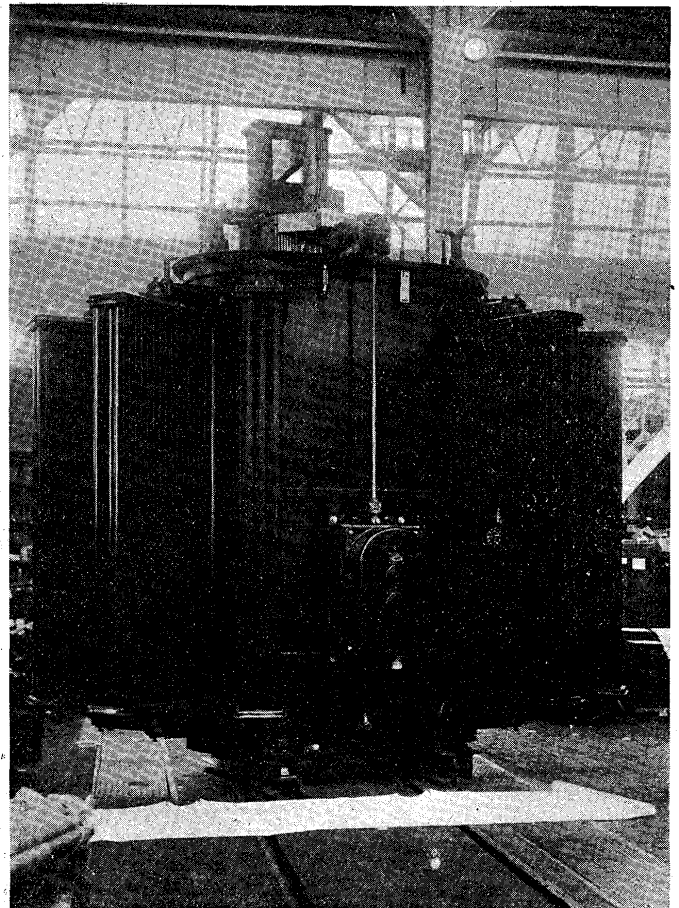
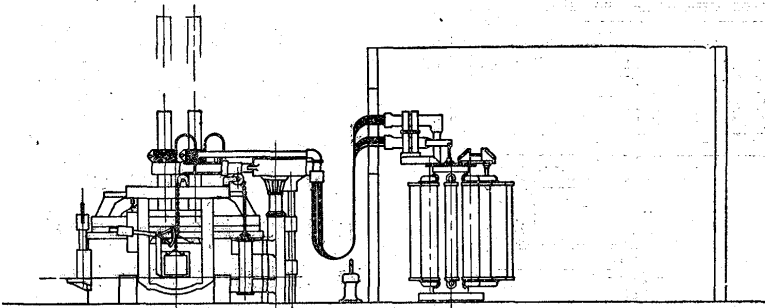


第15圖 電氣弧光爐組立圖 (其の2)
(株式會社大同電氣製鋼所)



第16圖 電氣弧光爐設備配置圖
(株式會社大同電氣製鋼所)

第17圖 電氣爐用變壓器
(株式會社芝浦製作所)



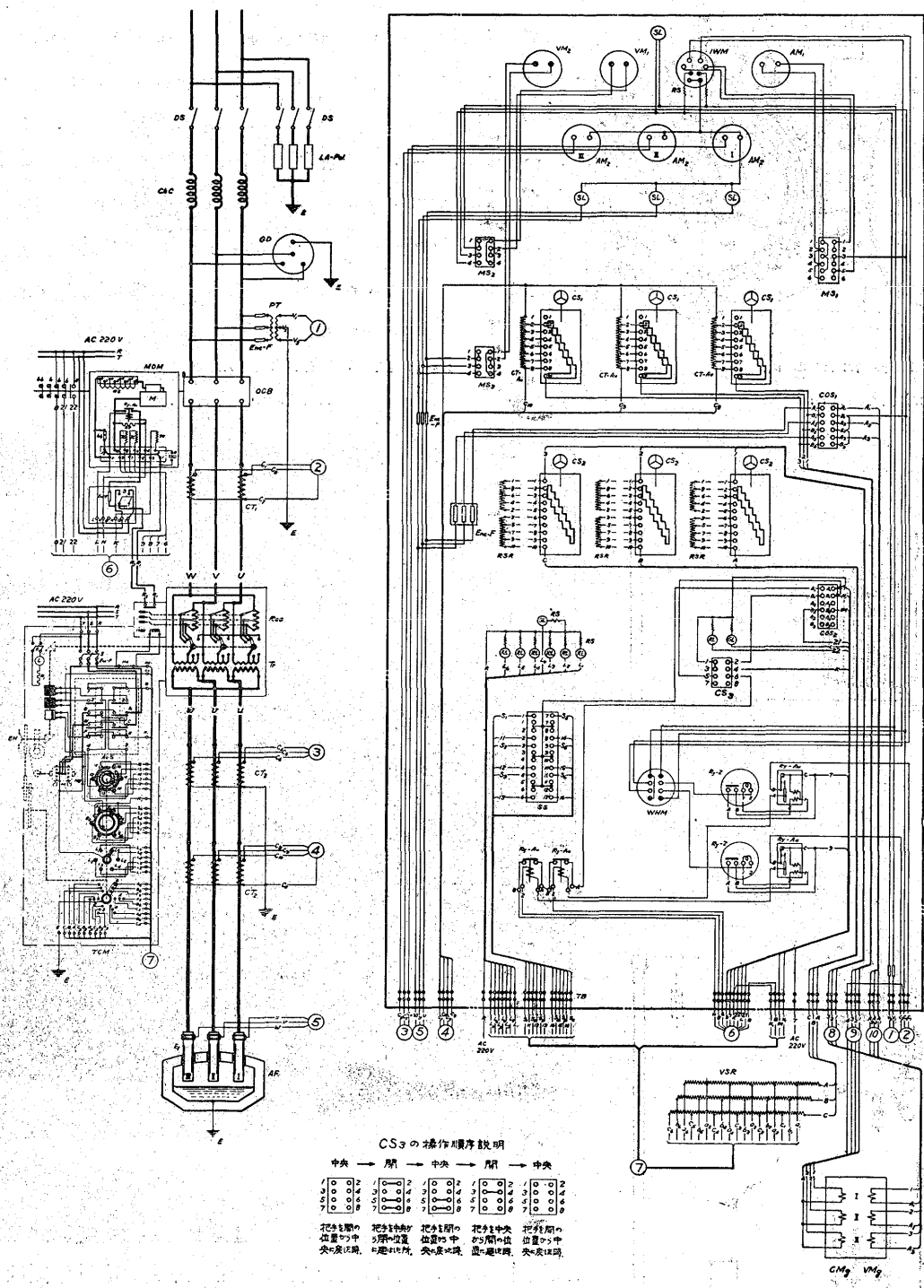
1. 電氣弧光爐の概要 實例の電氣弧光爐は最近の設計製作に係り、鎔解容量 10,000 kg, 電氣容量 3,500 kVA である。第 14 圖、第 15 圖は組立圖、第 16 圖は設備

配置圖、第 17 圖は電氣爐用變壓器の外観、第 18 圖は標準結線圖を示す。電極の昇降は水壓式自動電流調整装置に依る。爐體の構造其他は之等圖面及寫眞で略知る事が出来ると思ふ。電氣設備中で變壓器は特に電氣弧光爐用として製作されたもので、一般動力用變壓器と稍趣を異にしてゐる事は注意を要する。その主なる特徴は次の如くである。

(1) 容量の割合に二次電壓が低いので、即ち著しく大電流となるために巻線及口出線の配置に特別の考慮を要する

第18圖 電氣弧光爐標準結線圖

(株式會社大同電氣製鋼所)



CS3の操作順序説明

中央	閉	中央	閉	中央
1 0 0 2	0 0 0 2	0 0 0 2	0 0 0 2	1 0 0 2
0 0 0 4	0 0 0 4	0 0 0 4	0 0 0 4	0 0 0 4
0 0 0 6	0 0 0 6	0 0 0 6	0 0 0 6	0 0 0 6

花巻1回閉、花巻1回閉、花巻1回閉、花巻1回閉、花巻1回閉
 位置1回閉、位置1回閉、位置1回閉、位置1回閉、位置1回閉
 中央1回閉、中央1回閉、中央1回閉、中央1回閉、中央1回閉

(2) 負荷たる電弧の性質上急激に且相當の廣範圍に負荷が變動する。この事は自動電流調整装置の機能と相俟つて出来るだけ避ける事が望ましいが、變壓器自身としては巻線、口出導線及支持部分の構造を電氣的にも機械的にも最も堅固に作り、巻線には爐全體のリアクタンスと變壓器自身の他の特性とを考慮して合理的なリアクタンスを持たせる事が必要である。

(3) 二次電壓は使用目的に應じて相當廣範圍に變化す

る事を要し二次側大電流のためタップを設けられぬから一次巻線に廣い範圍のタップを設け又△-1切換を行ふ等の必要があり、巻線の配置にも考慮を要する。巻線端に過電壓を誘起せぬ事及び一次、二次の磁氣的中心が移動し又漏洩磁束による漂遊損失増加、局部過熱等の心配の無い様に配置、巻方向、巻線間絶縁等に注意しなければならぬ。

(4) 相當の過負荷及び不平衡負荷に充分耐へることが必要である。

(5) 負荷の duty cycle に應じて、爐全體としての能率を最も高くする事を目標に置き、他の要素との釣合を考慮して變壓器の能率を定めることを要する。

2. 豫定特性 特性の基礎となる諸量は單に前述の關係のみでなく他方面の條件から決定されるものが多い。電氣的特性を豫定すると云つても他の條件から理論的に決定される數値と聯繫して定めるのであるが、その一つの豫定法として電氣的諸定數を定める順序を中心にして述べる。他の方面から數值的に決定され

た定數はその結果のみ示し之が詳細の方法は本問題としては省略した。

第7圖からも明かである様に、所要電力、電弧電力は一つの極大値を有するから或る電力値を與へる電弧電流は大小二つ存在するわけであつてこの内當然有利なる小さい方の電流を選定すべきである。従つて使用電流の經濟的限度が定まる。以下述べる各項で總て電流はこの範圍にあるとは勿論である。

(1) 電弧電力：一爐體の熱損失、鎔解に要する熱量、鎔解時間、冶金學的諸條件其他多くの條件から之を定めた。豫定計算の結果變壓器を過負荷して過容量鎔解を左程不利な條件でなしに行ふには電弧電力の最高限度としては4,000~5,000 kW, 通常操業で定格負荷定格容量鎔解には定格電弧電力として約 3,000 kW 程度と豫定した。最大電弧電力は (11) の如き關係にあるから、

$$\text{電弧電力 (kW)} \leq 3/2 \cdot 10^{-3} \cdot (E^2/X) \tan(\theta_s/2) \dots \dots \dots (22)$$

又この最大電弧電力の場合の他の諸量は(1)乃至(9)から求め得るから、最大電弧電力、定格電弧電力が與へられると他の諸量は各々勝手に決定する事は出来ないで次の關係で拘束される。

$$\text{爐電流 (A)} \leq (E/X) \cdot \sin(\theta_s/2) \dots \dots \dots (23)$$

$$\text{電弧電壓 (V)} \geq 1/2 \cdot E \sec(\theta_s/2) \dots \dots \dots (24)$$

$$\text{所要電力 (kW)} \leq 3/2 \cdot 10^{-3} \cdot (E^2/X) \sin \theta_s \dots \dots \dots (25)$$

$$\text{力率} \geq \cos(\theta_s/2) \dots \dots \dots (26)$$

$$\text{電弧能率} \geq 1/2 \cdot \sec^2(\theta_s/2) \dots \dots \dots (27)$$

(2) 電弧電壓：一安定なる交流電弧の固有最低電壓よりも高く採るべきは勿論であるが、その電壓値の決定は他の方面から目標が定まる。例へば爐體の構造寸法、融體の形狀寸法及電氣抵抗、耐火物への影響其他數多くの要素を考へて最高電壓を定め、電弧電力と關聯して電壓の種類を定めた。(24) の關係から電源の端子電壓 (E) と短絡電流位

相角 (θ_s) とは別々に定める事が出来ない。

(3) 力率：一(26) の條件以外に短絡電流と關係がある。そこで電氣設備の安全と爐設置地方の送電容量の見地から短絡比率を決定しなければならぬ。極短時間の過負荷ならば、定格電流の 250% 迄は許される程度であつた。實際には自動電流調整装置の鋭敏な動作によつて過電流は極めて迅速に操業範圍に復歸させる事が出来、瞬時的の過電流に對しては電氣設備に充分な保護装置があり、又この弧光爐は用途上完全なる短絡は起り得ない。之等の點を考慮して計算上では 300% (短絡比率 1/3) を目安とした。最大電弧電力に於ける力率を約 80% と豫定すれば、(26) より $\theta_s \approx 70^\circ$ となる。第 3 圖からこの θ_s に應じて短絡比率 1/3 なる點を求めると定格電流位相角 $\theta \approx 18^\circ$ 従つて、この場合の力率は約 95% となる。

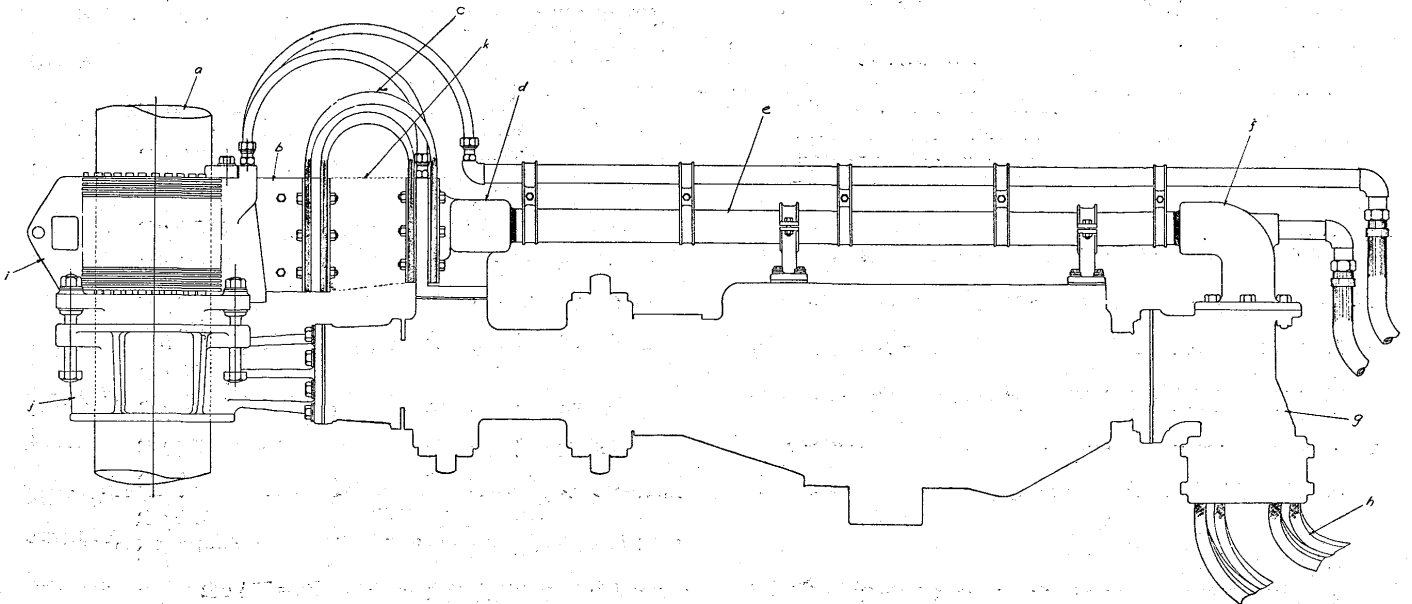
(4) 端子電壓及固定リアクタンス：一 θ_s が決定すると(22) より (E^2/X) の値が制限される。同時に又固定リアクタンスと固定抵抗の比も定まる。固定抵抗の値を概算して順次 E, X が決定した。この E の値を(24) の關係に入れて見て、電弧電壓が不等式を満足する。

(5) 爐電流、所要電力及び電弧能率：一 上述の各項が豫定されると、之等は(23),(25),(27) 等から自然に定まつて来る。茲で負荷率其他の事項を検討して、特性計算の基礎

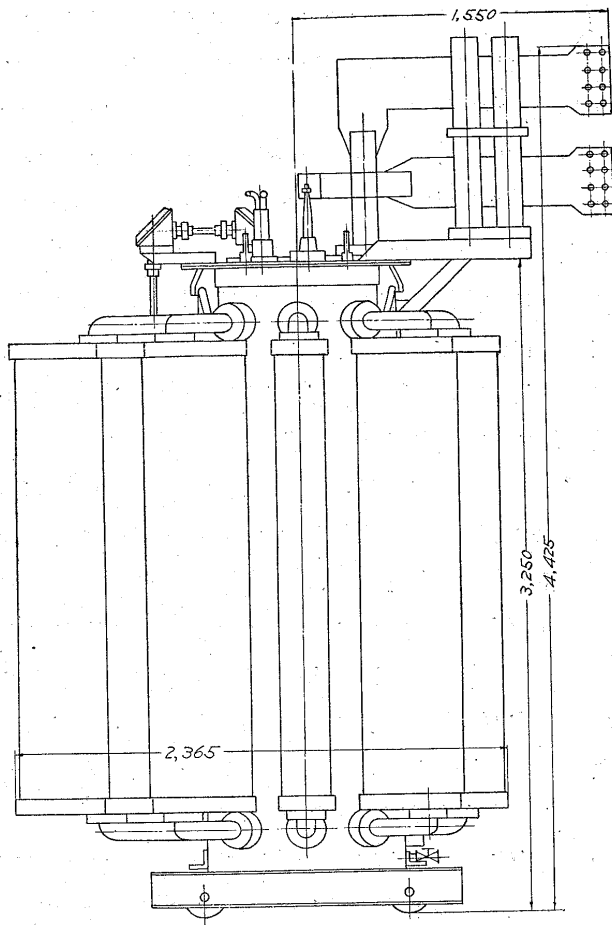
第 19 圖 電極支腕組立圖

- | | | |
|------------|------------|--------------|
| a. 電 極 | d. 前部母線端子 | h. 可 撓 電 纜 |
| b. 接 觸 銀 | e. 母 線 管 | i. 電 極 把 持 器 |
| c. 可 撓 銅 帶 | f. 後部母線端子 | j. 電 極 支 持 器 |
| (電極折損防止裝置) | g. 電 纜 端 子 | k. 警 報 裝 置 |
| | | (電極折損防止裝置) |

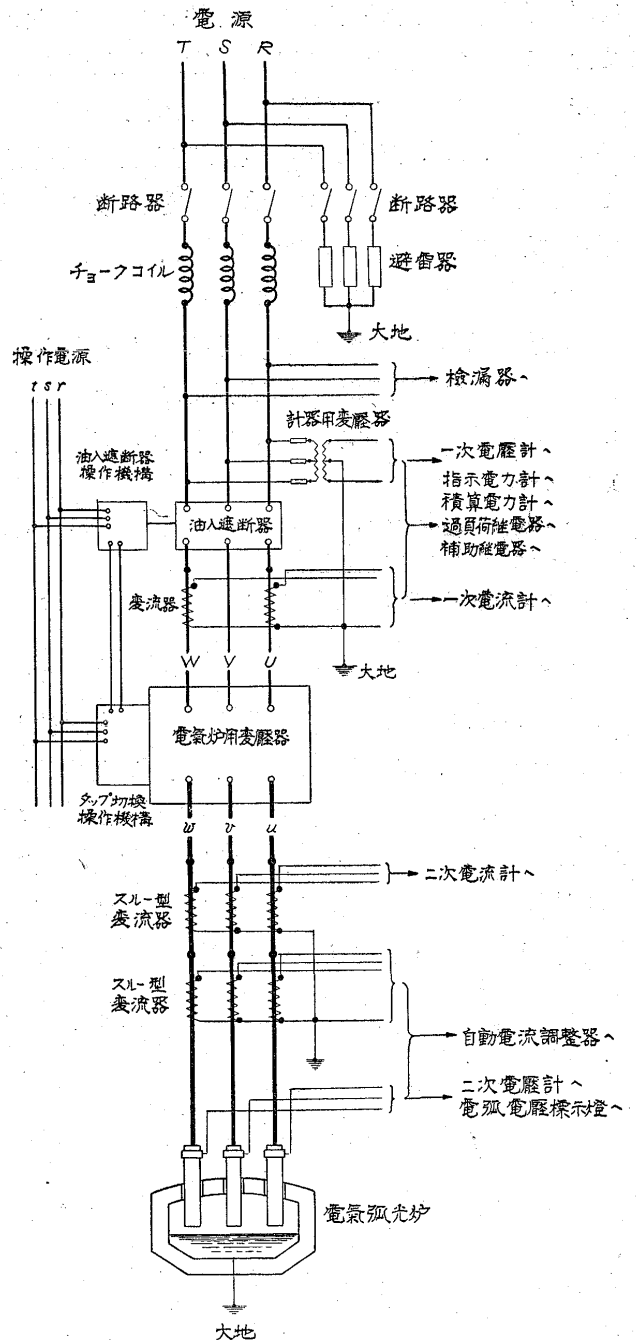
電極折損防止裝置特許第 114,167 號



第 20 圖 電氣爐用變壓器外形圖



第 21 圖 電氣弧光爐結線圖



となる値を豫定する。

3. 設計々算 第 16 圖の配置圖の中で、イムピーダンスに關係する部分を第 19 圖、第 20 圖に示す。又電氣的には第 21 圖の如くである。各部に就て設計々算の結果の内、固定抵抗、固定リアクタンスの値を摘記すれば次の如くである。

(1) 固定抵抗 R_b (各相) :— 固定抵抗の内接觸抵抗は、接觸壓力、材質、接觸面の工作並處理、使用時に於ける溫度、有效接觸面積等に依つて定まる無誘導抵抗である。導體抵抗は、溫度、導體斷面の形狀等を考慮した實效抵抗の値を求めた。複雑なる形狀のものは何れも近似的に長さ、斷面積等を算出して行つた。

接觸抵抗

1. 電極周邊と接觸鏝内面	1.0 $\mu\Omega$
2. 接觸鏝後端と可撓銅帶前部	0.3 $\mu\Omega$
3. 可撓銅帶後部と前部母線端子	0.2 $\mu\Omega$
4. 前部母線端子と母線管	0.2 $\mu\Omega$
5. 母線管と後部端子	0.2 $\mu\Omega$
6. 後部端子と電纜端子	0.6 $\mu\Omega$
7. 電纜端子と可撓電纜前部	0.3 $\mu\Omega$
8. 可撓電纜後端と變壓器二次端子	0.2 $\mu\Omega$

計	30 $\mu\Omega$
導體抵抗	
1. 電極 (平均操業位置)	5850 $\mu\Omega$
2. 接觸鏝	0.9 $\mu\Omega$
3. 可撓銅帶	2.8 $\mu\Omega$
4. 前部端子	5.7 $\mu\Omega$
5. 母線管	15.5 $\mu\Omega$
6. 後部端子	2.0 $\mu\Omega$
7. 電纜端子	2.1 $\mu\Omega$
8. 可撓電纜	16.0 $\mu\Omega$
9. 變壓器 (二次換算値)	141.0 $\mu\Omega$
計	771.0 $\mu\Omega$
平均固定抵抗	$R_b = 774 \mu\Omega$

(2) 固定リアクタンス X (各相) :— 各部の形状複雑で操業中相互位置も變化し、鐵部の影響が電流の大きさに依つて相違し、表皮作用のため電流の分布状態が變化する等の點を考へると、X は一定値ではないが、平均操業位置で、平衡負荷である場合を念頭に置き、近似公式或はこの公式から誘導した近似式を用ひて算定した。以下各項に於ける近似式中で次の如く定める。

$\omega = 2\pi f$ (f: 周波數)

$\gamma_g =$ 導體斷面の幾何學的平均距離 (cm)

$l =$ 長さ (cm)

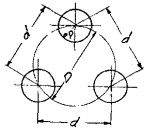
$d =$ 中心距離 (cm)

1. 電極 570 $\mu\Omega$

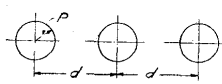
$X = 2 \cdot \omega \cdot l \cdot (\log d / \gamma_g + 0.25) \cdot 10^{-3} \mu\Omega$

$d = 0.866 D$ (第22圖参照)

第 22 圖



第 24 圖



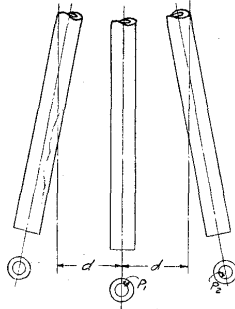
$\gamma_g = 0.7788 \rho$

2. 母線部 (平均)

960 $\mu\Omega$

(接觸環より電纜端子に至る部分)

第 23 圖



$X = 2 \cdot \omega \cdot l \cdot (\log d / \gamma_g + 0.481) \cdot 10^{-3} \mu\Omega$

$d =$ 幾何學的平均距離 (cm)

$\gamma_g = 1/2(\rho_1 + \rho_2)$ (第23圖参照)

3. 可撓電纜 (平均) 940 $\mu\Omega$

$X = 2 \cdot \omega \cdot l \cdot (\log d / \gamma_g + 0.481) \cdot 10^{-3} \mu\Omega$

$\gamma_g = 0.7788 \rho$

$\rho =$ 電纜束の等價半徑 (第24圖参照)

4. 變壓器 (二次換算値) 587 $\mu\Omega$

計 3,057 $\mu\Omega$

平均固定リアクタンス

$X = 3,057 \mu\Omega$

(3) 完全短絡力率角

$\theta_s = \tan^{-1}(3,057/774) = \tan^{-1}3.9496$

$= 75^\circ 48'$

$\sin \theta_s = 0.96945, \cos \theta_s = 0.24503$

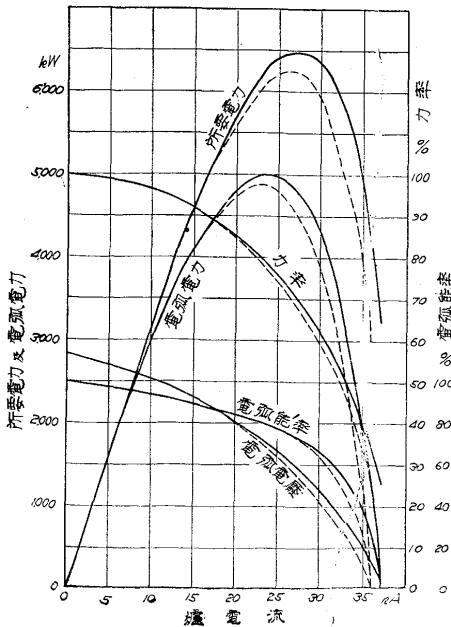
これから特性曲線を求めて、第 25 圖點線の如き結果を得た。全イミピーダンスの値から考へてリアクトルは設備しない事とした。

4. 短絡試験 本弧光爐設置後特性を求めるために短絡試験を行つた。試験用電源としては、3,450 V の三相交流を第 21 圖の斷路器の部分に接続し、短絡鉞としては、厚き硬銅鉞を爐蓋煉瓦の直上に載せ、電極及電極エコノマイザーを操業状態と同様に裝備した。尙銅鉞上には黒鉛粉末を無水タールにて煉つたものを置き、之れに三本の電極を押付けて電弧を短絡した。試験開始後各計器の指示が安定したる後必要なる記録を取り、之を端子電壓の各種接続

第 25 圖

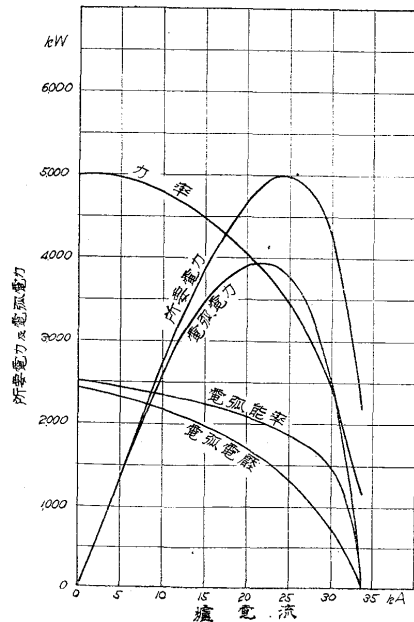
電氣弧光爐特性曲線 (變壓比 113 の場合)

— 短絡試験による特性
 設計計算による特性



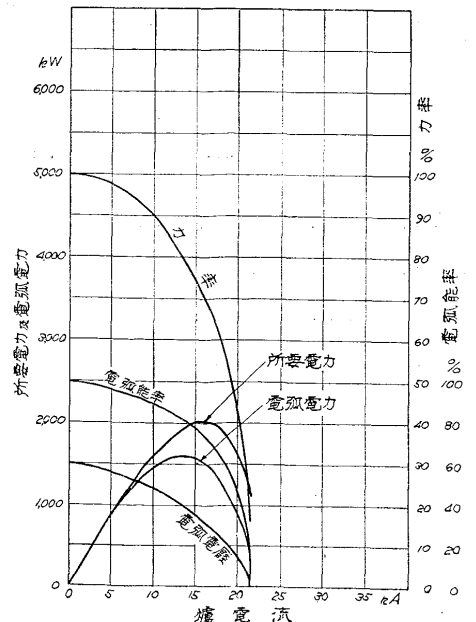
第 26 圖

電氣弧光爐特性曲線 (變壓比 131 の場合)



第 27 圖

電氣弧光爐特性曲線 (變壓比 209 の場合)



の場合に就て行つた。電極端に於ける電壓降下は別の計器で測定し、不完全短絡負荷として短絡電力より控除して完全短絡状態に於ける諸値を計算した。特性に關係ある數値を抜記すれば下記の通り。計算の方法は(16)乃至(21)に従つた。計算の誤差を少なくするため、變壓器を利用して短絡電流が定格電流の60%内外となる様に接続した。

一次線間電壓 (V) 7,080 (各線間)
 一次線路電流 (A) 32, 34, 31
 二次線路電流 (A) 6,460, 6,800, 6,300
 一次電力 (kW) 135
 不完全短絡電壓 (V) 2.1, 1.8, 2.2

以上の値から特性の基礎量を算出すれば、

電流三角形の内角 $\beta_1=58^\circ 46'$, $\beta_2=65^\circ 18'$, $\beta_3=55^\circ 56'$
 皮相電力 $P_0(\text{kVA})=396.2$
 所要電力 $P(\text{kW})=135$
 不完全短絡電力 $Q(\text{kW})=39.5$
 無効電力 $P_x(\text{kW})=372.5$
 平均固定抵抗 $R_b=750.8 \mu\Omega$
 平均固定リアクタンス $X=2936 \mu\Omega$
 完全短絡力率角 $\theta_s=\tan^{-1}(X/R_b)=75^\circ 12'$
 $\sin \theta_s=0.9368$, $\cos \theta_s=0.2554$

この値から特性曲線を求めると第25圖實線の如き結果となつた。

其他の接続の場合も同様の測定値から同じ順序で基礎量を求めて、特性曲線を作る事が出来る。全部で六種類の接続の内の二接続の場合の特性として、第26圖、第27圖を得た。

今第25圖に就いて二つの方法から求めた特性曲線を比較して見ると、使用電流範囲に於てはかなり近似せる値を示して居る事が察知出来る。實際の特性は表皮作用其他の影響により、この二曲線より幾分下方に位することも想像されるが、實用的にはこの程度で満足出来ると思ふ。

結 言

電氣弧光爐の電氣的特性を、實例を擧げて概述した。理論的取扱夫自身に尙未研究の部分が、然も實際的研究に種々の不便のある電氣弧光爐を對象とするのであるから豫定特性と實際特性とを完全に一致させる事はかなりの難

事であり、上述の實例中でも局部的には數値上の誤差が相當あると思はれるが、全般的特性から見ると、實用價値は少くないと思ふ。殊に特性曲線は現場操業上單に電氣的のみならず、冶金的、熱的にも尠からぬ便宜を與へ、作業上の研究にも一つの指針となり、種々の研究題目を包括して居ると信ずる。

要之、電氣弧光爐の設置計畫に際しては、設計々算によつて、豫めその電氣的特性の概要を豫定して置くことは、必要不可欠の條件であり、電氣的特性並に他の特性を綜合して設計、製作するに非ざれば眞に優秀なる爐としての資格はない。一方又爐操業の場合には、計算及び試験等の結果より得られた諸特性をよく了解して爐の眞價を充分に發揮せしめ、合理的な操業を行ふべきである。この意味に於て電氣的特性の重要性を重ねて強調すると同時に、眞劍なる研究と貴重なる體驗とに依つて、未開拓の分野が闡明され電氣弧光爐が更に向上進歩の堅實なる歩みを續けることを切望して止まない。終りに、本問題に關して種々懇切なる注意と指導とを賜りたる川崎舎博士に深甚なる感謝の意を表す。

参 考 文 獻

- (1) 川崎舎：弧光爐に於ける電氣回路の特性、電氣製鋼 Vol. 7 No. 11.
- (2) 川崎舎：電氣製鋼爐の電氣的特性、鐵と鋼 第21年第2號附録（電氣製鋼爐に關する議事録速記）
- (3) J. Wotschke: Grundlagen des elektrischen Schmelzofens. (1933)
- (4) F. V. Andreae: The reactance of large rectangular three phase electric furnace. Trans. Elect. Chem. Soc. Vol. 57 p. 151~168.
- (5) F. Walter: Zur Entwicklung von Lichtbogenöfen grosser Leistungsfähigkeit. Elektrowärme, 1935 S. 25~31, 53~58, 87~90.
- (6) A. A. Meyer: Electrical characteristics of electric furnace. Trans. Amer. Elect. Chem. Soc. Vol. 31, p. 97.
- (7) Catani: The calculation of electric furnace circuits. Trans. A. I. E. E. 1928 p. 125~155.
- (8) S. Schey: Elektrische Ausrüstung des Drehstrom-Lichtbogenofens. A. E. G. Mitteilungen, 1928 Heft 8, S. 522.