論 文

UDC 621.356.2.01:669.187.2

大電力製鋼アーク炉の電氣的考察

古	橋	治	義*
曾	根	定	家*
志	知	營	一*

Electrical Consideration of High Power Electric Arc Furnace

Haruyoshi Furuhashi, Sadaie Sone, Eiichi Shichi

【概 要】

数年前米国に端を発したアーク炉生産性向上の手段としての超大電力 (Ultra High Power; UHP) 操業がわが国においても最近注目されてきた。この機会にUHPに関して、アークの挙動、アーク炉の電気特性、不平衡回路の取扱い、炉の生産性、フリッカなど、アーク炉全般について、電氣的見地から最近の技術的傾向をまとめた。近年アーク現象の解析は高速度カラー映画の導入で急速に進み、いっぽう、アーク炉三相不平衡回路の解析も計算機技術の助けによって大きな進展を約束されている。これらの新しい技術に基づいたアーク炉研究の一端として、アークからの伝熱、不平衡回路の解析、生産性の向上などに関して新しい提案を試みた。また、大電力投入に伴って、ますます表面化するであろう炉壁のホットスポットの問題に対してもいろいろの指針を提起した。さらに、アーク炉フリッカの問題については一般的な説明を述べると共に、UHP時に予想される方向を示唆した。

1. ま え が き

W. E. Schwabe および C. G. Robinsonが1964年 AIME, Electric Furnace Conferenceに製鋼用アーク炉の超大電力操業 (Ultra High Power Electric Steel Furnace Operation) なる論文¹⁾を発表して以来、超大電力 (Ultra High Power, 以下 UHP という) あるいは大電力 (High Power, 以下 HP という) アーク炉がきわめて魅力的なものとして、電気製鋼分野の話題にのぼっている。このような反響は論文に

述べられているごとく、60~75t/h という従来のほぼ2倍にあたる高生産性が得られ、酸素上吹き転炉のそれに迫っているからである。そしてその技術的要因として大電流、ショート・アークによる大電力投入の有効性の立証が背景となっていることである。

もともと UHP あるいは HP とは従来の電気容量に対する比較から生まれた言葉である。その分類の一例として、アメリカの基準例を Table 1²⁾ に示す**。いっぽう、わが国のアーク炉の電気容量の経過をたどてみると、昭和27年、当社がレクトロメルト社と技術提

昭和42年11月6日 受付

* 大同製鋼株式会社 高蔵製作所

** 著者は炉殻内径 11~24 ft アーク炉のデータによって分類したと記述しているが、日本の現状からみると 100t 以上の炉にのみ適用されるものと考えられる。

Table 1. Power classification of electric arc furnace.

Designation	Maximum sustained power levels during meltdown at primary of furnace transformer		
	kW per ton Hot metal f_1	kW Per m ³ Furnace volume f_2	kW per m ² Hearth area f_3
Regular Power	135 ~ 210	176 ~ 300	645 ~ 968
High Power	220 ~ 290	317 ~ 424	968 ~ 1,290
Ultra high Power	335 ~ 500	530 ~ 1,130	1,400 ~ 1,940

Note : Figures in ft-lb unit have been converted to metric unit.

Table 2. Comparison of transformer capacity for arc furnaces before and after 1952.

Furnace capacity (t)	Standard transformer capacity (kVA)	
	Before 1952	After 1952
3	1,200	2,000
5	1,800	3,125
8	2,800	4,375
10	3,500	5,000
15	4,500	6,250
20	6,000	7,500

携をする前とその後最近までの電気容量とは Table 2 に示すごとく、確然とした相違があり、当時としては後者は明らかに大電力であった。しかしながら、電力投入面からは両者ともそれほど大きな違いはなく、いずれも高力率の低電流、ロング・アーク操業を基調としたものであり、後者の高電力化もその主体は高電圧にもとづくものであった。したがって、今日のUHPあるいはHPとはその技術的要因においてははっきり異質のものである。

それでは今日のUHPあるいはHPはいかなる環境、要素によって生まれたのであろうか。その第一は生産性向上に対するやむことのない欲求であり、これに加えて、最近の計測、計算機などの技術的進歩により、アークならびに電気的諸条件の解明が容易になったこと、強大な電源が得られ、かつ、大電流を流し得る電極が開発されたことが主因と考えられる。

以上のことから本稿では、アーク炉の電気的諸特性の基本的考察、UHP、HPアーク炉の特性および設備上の諸問題を、主として電気的観点より記述することにする。

2. アークの挙動

2.1 基本特性

アークは放電の最も発達した状態で、アーク電流が増加するにつれてアーク電圧が減少するという負特性を有することが実験的に確かめられている。最も代表的なものとしてW.B. Nottinghamの実験式³⁾がある。

$$V = a + bL + \frac{c + dL}{I^n} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし、V：アーク電圧

I：アーク電流

L：アーク長さ（電極間隔）

a, b, c, d；定数

上式にはアークの負特性のほか、電流が一定の場合にはアーク電圧が電極間隔に比例することが示されている。

アーク炉におけるような大電流・大電力アークについての特性は未だ十分には解明されていないが、定性的には実験室の結果を利用しても実用上は差支えないと考えられる。アークの負特性は電流が増加するにつれてピンチ効果が一層顕著に作用して、アーク柱

内部の温度が上り、プラズマ状態が発達してより完全プラズマの方向へ近づくため、いよいよ電流が流れやすくなることが主因と考えられる。

アークは負特性を有するので、安定なアークを得るためには垂下特性の電源が必要である。実際のアーク炉では大形炉は炉回路の有するリアクタンスで、また小形炉ではこれにリアクトルを追加して、電源側を垂下特性とし、全体として正特性にしている。アーク安定化のためには、炉回路のリアクタンスは%リアクタンスで表して大体35%以上が必要である。

一般にアーク炉では交流電源を使用するので、電圧の半波毎にアークは点弧→消滅→再点弧→消滅を繰返すことになる。そのため、正弦波電圧の電源に対しても、アーク電圧、電流の波形は Fig. 1 に示すようにひずんでくる。電圧が零のときは電流も零で、

Fig. 1. Waveform of current and voltage in an AC arc.

電圧が放電電圧まで上ると電流が流れはじめ、その電流の増加にともなう、アーク電圧はその電流に応ずるまで下がる。電源電圧が放電電圧以下になっても、アーク付近は温度が高くなっているため熱電離の助けもあって、なお、しばらくアークが持続してから電流、電圧共に零になる。

実際のアーク炉では放電電極の一方が黒鉛電極で、他方がスクラップ（または鋼浴）という非対称のため、アーク自身に整流作用があるために、このアーク電圧、電流の波形も半波毎に非対称となる。電極側のアークスポットの方が流動的な鋼浴上のアークスポットよりは固定的であり、スポット部が高温になり得る（黒鉛は昇華温度が高くて熱電子放出が可能）ことなどから、電極側が陰極になった半サイクルの方がアークも点弧しやすく、電流も流れやすいようである。事実、アーク炉操業時のアーク電流波形の測定データに、各半サイクルしか電流が流れていない数サイクルを見ることがある。操業時のアーク電流波形の記録から溶解初期は非常に多くの高調波を含んでいて

波形のひずみが大きい、溶鋼ができるにつれて高調波分が減少する傾向がわかる。これはアーク付近の温度が上がることで、アーク長さの変化が少なくなることが主たる理由であろう。また同じ条件では大電流になる程、アーク電流波形は高調波分が減少してなめらかとなり、アークは安定の方向へ向うようである。

アーク炉全体をながめた場合には、安定したアークの電流波形は正弦波に近いこと、炉用変圧器2次端子では回路定数の影響で電圧波形も正弦波に近いことなどから、アーク炉特性の解析には、電圧・電流共に正弦波にもとづいて計算しても実用上差支えない。

2.2 アークの発熱と伝熱

アークの長さ方向の電圧は Fig. 2 のような分布をしており、陰極と陽極の近くではそれぞれ急激な電圧降下があり、アーク柱部ではその長さに沿って一様な電圧降下をしている。実験的には陰極降下と陽極降下はそれぞれ3～20V程度だと報告されている。主として前者は電子放出のため、後者は陽イオン生成のためと考えられる。

Fig. 2. Distribution of arc voltage.

いっぽう、アーク柱は非常に高温になっていて3,000～10,000 °K といわれている。そのため輻射能の大きい赤外線放出が少なく、アーク柱からの熱輻射は少ないと考えるのが妥当であろう。アーク電圧の大部分を占めるアーク柱降下は主として電子の加速に役立ち、電子が到達する陽極での発熱がスクラップ（鋼浴）の加熱に最も貢献していると考えられる。

電極側のアークスポットでの発熱は電極を流れるアーク電流によるジュール加熱とともに、電極を赤熱させてスクラップを輻射加熱するのに役立っている。しかし、電極の温度が高くなると電極の酸化損失の増加は避けられない。特に炉蓋と電極把持器の間の電極が炉外にある部分の発熱はまったく熱損失であり、酸化

も一層はげしく、また電極の温度上昇にともなって水冷把持器からの熱損失も増加するので、電極の赤熱は望ましくない傾向である。近時、アーク炉に超大電力の投入が可能になったのは低抵抗の電極が開発されて、大電流を流し得るようになったことに起因している。

また、スクラップ中を流れるアーク電流による抵抗加熱やアークにともなって発生するジェットガスもアーク柱からスクラップに熱を運んで、スクラップの加熱に役立っている。このジェットガスは、溶解中期までのスクラップが残存している間はスクラップ全体の加熱に非常に効果的であるが、溶解末期には炉壁のホットスポットともからんで、操業上の好ましくない問題を提供す。ショート・アークではこのジェットガスの炉壁への拡散力が弱められるので、特に溶解末期にショート・アークが推せんされる理由の一つとなっている。

大電流・大電力アークではピンチ効果も一層顕著となり、エネルギー集中が促進される。この高エネルギー密度のアークで溶解された鋼浴は、エネルギー密度の低い小電流アークで溶解された鋼浴よりも、溶解直後の温度が高くなる。したがって、全体として溶解終了時の鋼浴温度は大電力投入溶解操業時には普通電力操業の場合よりも高くなっている。このことは大電力の投入が溶解時間の短縮以外にも、溶解以後の昇温作業を容易にし、精練時間を短縮するのに、特に大形炉では有益であることを意味している。

2.3 アークに作用する力⁶⁾

三相アーク炉では各相電流相互間の電磁力に影響さ

れて、アーク柱は炉壁方向へ傾く傾向がある。このアークに作用する力の解析を試みる。まず、三相アーク炉の基本として電極が正三角形配置され、三相平衡正弦波電流が流れている場合を考え、各相電流を次のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \\ i_b &= I \sin \omega t \\ i_c &= I \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

ただし、 I ：平衡アーク電流波高値

一般には、平行におかれた十分長い2本の導体に電流が流れた場合、導体の単位長さに働く電磁力の計算式を母線、電極やアークに作用する力の計算に使用しているが、アーク炉のアークに働く力を考える場合には、電流の流れる導体としては Fig. 3(a)に示すように、電極把持器から鋼浴までの有限長さを考え、次式を使うのが妥当であろう。

$$F = \frac{i_1 \cdot i_2 \sqrt{h^2 + s^2}}{h \cdot s} \times 10^{-7} \dots\dots\dots (2.3)$$

ただし、 F ：アークの単位長さに働く力

h ：鋼浴面からの電極把持器の高さ

s ：電極間距離

i_1, i_2 ：2導体各々の電流

Fig. 3 (b)に示す電極配置で、B相のアークに作用する力は(2.3)式から次のように表せる。

$$F_{ab} = \frac{\sqrt{h^2 + s^2}}{h \cdot s} \cdot I^2 \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \sin \omega t \times 10^{-7}$$

Fig. 3. Magnetic force on arc in three-phase arc furnace.

$$F_{be} = \frac{\sqrt{h^2 + s^2}}{h \cdot s} \cdot I^2 \sin \omega t \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) \times 10^{-7} \quad (2.4)$$

(2.4) 式の合成から

$$F_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{h^2 + s^2}}{h \cdot s} \cdot I^2 \sin \omega t \left(\sin \omega t - j \frac{3}{2} \cos \omega t \right) \times 10^{-7} \quad (2.5)$$

この式から求まるベクトルを Fig. 3(b) に示す。この電磁力ベクトルは電流の半サイクルで電流の相回転と同方向に1回転し、ベクトル先端の軌跡は円をえがく。

各相アークには電極サークルに対して常に外向きの力が働いていることになる。 $\omega t = \pi/2$ 、すなわち、B相アーク電流の最大値において電磁力 F_b は最大 $\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{\sqrt{h^2 + s^2}}{h \cdot s} \right] \cdot I^2 \times 10^{-7} \right)$ となり、X軸の方向をむく。

いっぽう、アークを形成している電子はアーク電圧にもとづく電極軸方向の力を受ける。

$$F_e = e \frac{V}{L} \quad (2.6)$$

ただし、 F_e : 電子1コに働く電気力

e : 電子の電荷 ($= 1.6 \times 10^{-19}$ クーロン)

V : アーク (アーク柱) 電圧

L : アーク長

(2.5), (2.6) 式から目安としてのアークの傾きは計算できる。しかし、実際のアーク炉においてはアーク電流とアーク長さの関係の不明確さ、電界の不均一、アーク自身のピンチ効果、炉内雰囲気の変動などが関係してくるため計算を直接は適用できない。(2.5), (2.6) 式からアーク長が短くなると、アーク全体が受ける電磁力が少くなり、いっぽうで電気力が大きくなるので、アークの傾きが少くなるのであろうことが推測される。

アーク炉でのアークの観察やこれらの試算でわかるように、アークは炉壁方向へ傾く。そのため、アークにともなって発生するジェットガス流をアークの方向、すなわち、鋼浴面ではねかえて炉壁方向へ吹付ける傾向があり、炉壁ホットスポットの一因ともなっている。アークからのガス流が炉壁耐火物の損耗を助長する原因としては、(i) ガスの高い温度、(ii) ガス中の CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 や C , CO の作用による化学反応などが考えられる。

アークを短くして、ジェットガスの拡散力を電極やアーク付近のスラグなどで弱めるようにしたり、アークの傾きを少なくする方向で操業することや、アークと炉壁の間にスクラップが存在せず、炉壁が大電力アーク

に露呈する期間をできるだけ短くする溶解技術などが、後述するホットスポット対策の一環となっている。

3. 電気的特性 (平衡回路として)

3.1 アーク炉等価回路

一般の三相アーク炉は導体の配置や構成上から、三相不平衡回路となっているが、実操業の指針として取扱う場合には、電氣的に正弦波形の三相平衡回路として考察しても十分に役立つ。本章では、Fig. 4(a) に示す三相アーク炉電気回路が、同図(b)の単相等価回路に置き換えられるものとして、回路定数の算出方法や炉の電気特性の求め方について述べる。

Fig. 4. Electrical circuit of three-phase arc furnace.

回路の抵抗、リアクタンスは変圧器、二次側母線、ケーブル、母線管、電極およびアーク安定化のためにリアクトルを付設する場合にはそれも含めた定数となる。これらの回路定数はすべて変圧器2次側に換算して取扱うのが一般的である。

普通のアーク炉では、供給電圧を炉用変圧器の一次側で6~17段に切換えて操業できるようになっている。この電圧、すなわち、変圧器二次電圧と回路定数の選定が、アーク炉の電気的特性を決定する主たる要因である。炉回路の定数は大電流母線であることや、回路の構成が電極の昇降に伴い時々刻々変化することから、操業時の数値を正確に把握することは困難であるが、実用上差支えない程度には計算や短絡試験で求められる。誤差の点からいって、一般に計算によるよりは短絡試験で求めた値の方が優れている。

3.2 炉回路定数の計算

炉用変圧器のインピーダンスについては、計算や特性試験でほぼ正確な値が求められるのでここでは取扱わない。

炉回路の抵抗分については母線材料の固有抵抗と導体断面積、長さから次式により求められる。

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} (1 + \delta) \dots \dots \dots (3.1)$$

ただし、 R : 抵抗

l : 導体長さ

S : 導体の断面積

ρ : 固有抵抗

(3.1) 式に示す δ は交流抵抗としての補正係数で、周波数にもとづく表皮効果や近接効果などによって決まる値で、0.3~1.0程度であるが、母線配置が複雑なため、正確には実測による方がよい。

いっぽう、導体のインダクタンスは一般に次の近似式で計算する⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} L &= 2l \left[\log_e \frac{2l}{D} - 1 + \frac{D}{l} \right] \times 10^{-9} \\ M &= 2l \left[\log_e \frac{2l}{D'} - 1 + \frac{D'}{l} \right] \times 10^{-9} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3.2)$$

ただし、 L : 自己インダクタンス

M : 相互インダクタンス

l : 導体長さ

D : 自己幾何学的平均距離

D' : 相互幾何学的平均距離

(3.2) 式は幾何学的平均距離にくらべて導体長さが十分長い場合の近似式であるから、短くて太い母線には補正を必要とする。アーク炉においては、導体の静電容量は無視しても特性にはほとんど影響をおよぼさない。

これらの計算式からわかるように、炉回路定数は概略導体の幾何学的形状や配置によって決まる。

3.3 アーク炉の電気特性

前述のようにアーク炉を正弦波形の三相平衡回路と見なした場合の電気特性を求める式は次のようになる。回路定数、電圧、電流はすべて炉用変圧器二次側に換算して考える。

$$\text{力 率} : \cos \theta = \sqrt{1 - \left(\frac{IX}{V} \right)^2}$$

$$\text{入力電力} : P = 3 I \sqrt{V^2 - I^2 X^2} = 3 V I \cos \theta \text{ (W)}$$

$$\text{無効電力} : P_x = 3 I^2 X \text{ (Var)}$$

$$\text{損失電力} : P_L = 3 I^2 R \text{ (W)}$$

$$\text{アーク抵抗} : r = \sqrt{\frac{V^2}{I^2} - X^2} - R \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$\text{アーク電圧} : E = I r = V \cos \theta - I R \text{ (V)}$$

$$\text{アーク電力} : Q = 3 I E = 3 I^2 r = P - P_L \text{ (W)}$$

$$\text{アーク能率} : \gamma = \frac{r}{R + r} \times 100 \text{ (}\%\text{)}$$

$$\text{完全短絡電流} : I_s = \frac{V}{Z} \text{ (A)}$$

$$\text{完全短絡力率角} : \theta_s = \tan^{-1} \frac{X}{R}$$

$\dots \dots \dots (3.3)$

ただし、 V : 無負荷相電圧、(V)

I : アーク電流、(A)

R : 回路抵抗、(Ω)

X : 回路リアクタンス、(Ω)

Z : 回路インピーダンス、(Ω)

入力電力が最大になる点では次の関係がある。

$$\text{最大入力電力} : P_m = \frac{3V^2}{2X} \text{ (W)}$$

$$\text{アーク電流} : I_m = \frac{V}{\sqrt{2X}} \text{ (A)}$$

$$\text{力 率} : \cos \theta_m = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

$\dots \dots (3.4)$

また、アーク電力が最大になる電流を最適電流 (Optimum current) と呼び、その時には次の関係式が成立する。

$$\text{最大アーク電力} : P_{am} = \frac{3V^2}{2(R+Z)} \text{ (W)}$$

$$\text{アーク電流 (最適電流)} : I_{am} = \frac{V}{\sqrt{2Z(R+Z)}} \text{ (A)}$$

$$\text{力 率} : \cos \theta_{am} = \cos \frac{\theta_s}{2}$$

$\dots \dots \dots (3.5)$

これらの関係から求めたアーク炉の特性曲線は Fig. 5 のようにえがける。この曲線からわかるように、最適電流値以上の電流での操業は、電力損失の割合が多くなるので電気の見地からは不利である。通常のアーク炉ではこの最適電流での回路力率は75%前後である。従来、電気の見地から85%以上の高力率での溶解が提唱されていたが、最近では後述するホットスポットとの関連および生産性向上のために投入電力を増加することの観点から、特に溶解期を75%前後の力率で運転し、力率の改善は炉用変圧器一次側にコンデンサを設置して行う傾向となってきた。

最適電流での操業はアークについて見ればショートアークであり、また電流の多少の変動に対しても安定したアーク入力を得られることから、アーク炉操業

Fig. 5. Characteristic curves of three-phase balanced arc furnace.

上望ましい方向である。さらに通常操業時に対する短絡時の電流変動が少なくなり、フリッカの軽減にも有効である。

3. 4 短絡試験による回路定数の算出

前節においてアーク炉回路定数の計算による算出方法を述べたが、既設炉においては短絡試験を実施してより正確な定数を求めることができる。ここでは短絡試験の結果から定数を算出して、炉の電気特性を解析する方法について概説する。

三相アーク炉における短絡試験では三相短絡と単相短絡の測定ができるが、相別のインピーダンスの算出、すなわち、自己リアクタンスと相互リアクタンスの分離が理論上できないので、近似値または三相平均値を算出するにとどまる。

短絡試験の方法は大別して、(i)操炉中に電極を鋼浴の中へ浸して測定するのと、(ii)休炉時に炉中に銅板を置き電極先端を短絡して測定する2方法がある。いずれの場合にも定格値に近い電流を流して測定するのが望ましい。

三相短絡試験の結果から、通常次式で三相平均値を求めて、アーク炉特性の解析を行なっている。アーク炉操業の指針としてはこの近似値で十分役立つ。

三相短絡試験時の測定値を

線間電圧: V_{12}, V_{23}, V_{31}	(V)
各相電流: I_1, I_2, I_3	(A)
三相入力: P	(W)
不完全短絡電力: Q	(W)

とすると、次の関係式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \text{皮相電力: } P_0 &= \frac{I_1 + I_2 + I_3}{\sin \beta_1 + \sin \beta_2 + \sin \beta_3} \cdot \\ &\quad \{V_{31} \cdot V_{12} \sin \beta_1 \sin (\alpha_1 + \beta_1) \\ &\quad + V_{12} \cdot V_{23} \sin \beta_2 \sin (\alpha_2 + \beta_2) \\ &\quad + V_{23} \cdot V_{31} \sin \beta_3 \sin (\alpha_3 + \beta_3)\} \text{ (VA)} \\ \text{無効電力: } P_X &= \sqrt{P_0^2 - P^2} \text{ (Var)} \\ \text{平均回路抵抗: } R &= \frac{P - Q}{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2} \text{ (}\Omega\text{)} \\ \text{平均回路リアクタンス: } X &= \frac{P_X}{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2} \text{ (}\Omega\text{)} \end{aligned} \right\}$$

$$\text{ただし, } \cos \alpha_1 = \frac{V_{31}^2 + V_{12}^2 - V_{23}^2}{2V_{31} \cdot V_{12}}$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{V_{12}^2 + V_{23}^2 - V_{31}^2}{2V_{12} \cdot V_{23}}$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{V_{23}^2 + V_{31}^2 - V_{12}^2}{2V_{23} \cdot V_{31}}$$

$$\cos \beta_1 = \frac{I_2^2 + I_3^2 - I_1^2}{2I_2 I_3}$$

$$\cos \beta_2 = \frac{I_3^2 + I_1^2 - I_2^2}{2I_3 \cdot I_1}$$

$$\cos \beta_3 = \frac{I_1^2 + I_2^2 - I_3^2}{2I_1 \cdot I_2}$$

..... (3.6)

このようにして求めた回路抵抗およびリアクタンス値と供給電圧（炉用変圧器二次電圧）から、アーク電流を変数として、Fig. 5に示すようなアーク炉の電気特性曲線をえがくことができる。

4. 不平衡回路としての電気的特性

4. 1 不平衡回路の要因と現象

製鋼用アーク炉は電源として一般に三相交流を使用し、また大電流が必要なので炉用変圧器で高圧電源を低電圧大電流電源に変換する。したがって、炉用変圧器から電極先端までの二次回路導体は普通の電気導体にくらべて非常に断面積が大きい。導体の配置はPhoto. 1にみるように、一般に平面状になりがちであり、また中央相導体の長さや外相導体の長さは異なる。更に可とうケーブル、母線管は電極の昇降と共に上下し、各相導体の相対的位置が変化することや、電流密度が均一に分布しないなどの問題がある。

これらの理由で各相の自己インダクタンスや各相間の相互インダクタンスは等しくない。その結果、炉用変圧器二次側は三相不平衡回路になっている。回路定数の不平衡のなかでも、特に相互インダクタンスの相違によるところが炉の操業に大きく影響し、三相電圧の相回転に応じて激動相、静止相の関係を誘起してい

Photo. 1. 70ton arc furnace.

る。次にこの関係を Fig. 4 (a)のアーク炉電気回路を参考にして簡単な条件の下で考えてみよう。

多くのアーク炉は二次導体の配置から自己インダクタンス、相互インダクタンスの間には近似的に $L_a = L_c > L_b$, $M_{ab} = M_{bc} > M_{ca}$ の関係があり、三相平衡電流を流した場合、相回転が $A \rightarrow B \rightarrow C$ の順ならば、ベクトル図は Fig. 6 で与えられる。

Fig. 6. Vector diagram of arc furnace circuit.

図において v_a, v_b, v_c は変圧器二次端子の電位で、電流ベクトル i_a, i_b, i_c の方向はそれぞれ各頂点の二等分線から力率角 θ だけ遅れた方向にある。各頂点からそれぞれの自己リアクタンスおよび相回転順に、相互リアクタンス降下に相当する電圧ベクトルをえがいて求められた点 V_a, V_b, V_c が各電極の電位で、これらの点から各電流ベクトルに平行線を引けば

1点 O' で交わる。 O' は溶鋼電位で回路抵抗は小さいので近似的に $O'V_a, O'V_b, O'V_c$ をそれぞれ各相のアーク電圧と考えてよい。図から明らかなように $O'V_a < O'V_b < O'V_c$ である。すなわち、アーク電圧はA相が最も低く、B、C相の順に高くなり、この図では平衡電流を考えているからアーク電力の大きさも電圧と同じ順になり、A相アークの発熱量が最も少なく、C相アークが最も多い。このことからA相を静止相、C相を激動相と称する。このため激動相電極下、および導体長が短かく自己リアクタンスの少ないB相電極下では溶解が早く、これら電極の裏壁は他の炉壁部分よりも極部の損傷が激しい。この部分をホットスポットという。これは相回転が逆にになれば発生場所も変わる。Fig. 7 はこの関係を示す。

Fig. 7. The relation between sidewall hot spot and phase rotation.

ホットスポットの大きさはアーク電力 Q とアーク電圧 E に比例するといわれ、これが耐火物摩損指数 (Refractory Erosion Index) : R_E として提案されている⁸⁾。炉の大きさが異なるときは電極と炉壁の最短距離を d として、ランバートの法則から $R_E = QE/d^2$ と修正して用いることができる。従来炉について R_E を求めた結果の一例を Fig. 8 に示す。この結果から明らかなように、50トン炉を境として R_E の値が大きくなり、実際に起っている現象と傾向としてよく一致している。したがって、この指数はホットスポットを考えるうえでの重要な要素である。

ホットスポットは炉の大きさにかかわらず大なり小なり発生するものであるが、炉が大きくなる程大となり、これが操炉上問題になるのは通常50トン炉 (15000kVA) 以上である。その対策としては水冷ボックスの取付け、摩損の少ない耐火物の使用、各相アーク電力が平衡化するように電流を調整すること、耐火物摩損指数が比較的小さく、かつアーク電力が最大とな

Fig. 8. Refractory erosion index vs. furnace capacity.

る大電流低力率操業、回路の不均衡を減少させることなどがある。このうち、不平衡の減少対策には次のような方法が考えられる。

- ① 導体の長さや形状を変えて自己インダクタンスの変化により平衡化する。
- ② 二次導体の配列の改善および水冷ケーブルの使用などにより、三相導体をできるだけ正三角形配置に近づけて相互インダクタンスを平衡化する。
- ③ 二次側の△接続点を電極把持器の所にして、往復母線部分を長くし相互インダクタンスが打消し合うようにする。

しかし、実際には電極の昇降、電流変動にともなう回路構成の変化などから完全な平衡化は困難である。したがって、配置、構造、保守などの面も含めた場合、正三角形に近い配置にすることが最も現実的で、妥当な方法と考えられる。

4.2 計算方法

Fig. 4(a)の三相アーク炉の電気回路から電流、電圧の関係を表すように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} v_a &= \{(r_a + R_a) + j\omega L_a\} i_a + j\omega M_{ab} i_b \\ &\quad + j\omega M_{ca} i_c + v_n \\ v_b &= \{(r_b + R_b) + j\omega L_b\} i_b + j\omega M_{bc} i_c \\ &\quad + j\omega M_{ab} i_a + v_n \\ v_c &= \{(r_c + R_c) + j\omega L_c\} i_c + j\omega M_{ca} i_a \\ &\quad + j\omega M_{bc} i_b + v_n \end{aligned} \right\} \quad i_a + i_b + i_c = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし v, i はベクトル表示で、相回転は $v_a \rightarrow v_b \rightarrow v_c$ とする。 M については構造上、一般に両外相と中央相の相互インダクタンスは等しいと考えても、それほど大きな誤差はないので近似的には次の仮定が成立する。

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= M_{bc} = m \\ M_{ca} &= M \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.2)$$

(4.2) 式により (4.1) 式は次のように簡単になる。

$$\left. \begin{aligned} v_a &= \{(r_a + R_a) + j\omega(L_a - M)\} i_a \\ &\quad + j\omega(m - M) i_b + v_n \\ v_b &= \{(r_b + R_b) + j\omega(L_b - m)\} i_b + v_n \\ v_c &= \{(r_c + R_c) + j\omega(L_c - M)\} i_c \\ &\quad + j\omega(m - M) i_b + v_n \end{aligned} \right\} \quad i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4.3)$$

この式をアーク炉三相不平衡回路の基本式として解けばよい。ここで一番問題になるのは回路定数の決定である。これは導体の形状、寸法、配置から計算で一応求めることができる。また単相短絡試験から次のように一部分を求めることもできる。

単相短絡時の関係式は (4.3) 式から次式をうる。

$$\left. \begin{aligned} v_{ab} &= \{(R_a + R_b) + j\omega(L_a + L_b - 2m)\} i_{ab} \\ v_{bc} &= \{(R_b + R_c) + j\omega(L_b + L_c - 2m)\} i_{bc} \\ v_{ca} &= \{(R_c + R_a) + j\omega(L_c + L_a - 2M)\} i_{ca} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

ただし、 v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} は相間電圧、 i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} は短絡電流。

測定結果と未知数の数の関係から R_a, R_b, R_c は直ちに決定されるが、リアクタンス分は $\omega(L_a - M), \omega(L_c - M), \omega(L_b - m - m + M)$ が決まるだけで $\omega(L_b - m)$ あるいは $\omega(m - M)$ は決まらない。このどちらかを求めるには計算と試験との総合から定めるのがよい。

さて何らかの適当な方法で回路定数は定まるとして、数値解を求めることは比較的簡単でベクトル図¹⁰⁾、デジタル計算機、交流計算盤の3つが考えられる。

本稿ではこれらのうち交流計算盤使用によりアーク炉三相不平衡回路の解析を試みたので、以下、それについて述べることにする。

交流計算盤とはアナログ計算機の一つで、大規模な電力系統の電氣的縮小模型であって、電力系統の主要要素である発電機、変圧器、線路、調相設備などをきわめて小電力の模型に作り、これらを接続して実系統とまったく相似な電氣諸量を再現し、これを測定して電力系統の特性を知ろうとするものである。主として電力潮流、故障電流、安定度などの解析に用いられるものであるが、電力系統の模型なので、もし回路定数が与えられれば、並列負荷や電源インピーダンスも接続して、実際のアーク炉回路を電氣的に模擬でき、アーク

炉の電気特性を容易に調べることができる。欠点はアナログ機器特有の誤差をとまうことである。その誤差の程度を調べるために簡単な条件で求めた解析解と比較したところ3%以下であった。この程度の誤差ならばアナログ的機器としての利点を生かし、電気特性の大体の傾向をつかむという目的には操作も簡単なので実用上十分役立つと考えてよい。

4. 3 計 算 例

Table 3. Circuit constants for calculation.

	$\frac{L_a - M}{L_b - m}$	$\frac{L_c - M}{L_b - m}$	$\frac{m - M}{L_b - m}$	$\frac{R_a}{R_b}$	$\frac{R_c}{R_b}$	$I_a : I_b : I_c$	
(1), (2)	1.33	1.30	0.215	1.24	1.37	1 : 1 : 1	Fig. 9, Fig. 12
						1 : 1.15 : 1	Fig. 10, Fig. 13
(3)	1.05	1.05	-0.029	1.04	1.04	1 : 1 : 1	Fig. 15

更に(3)は大電力操業を仮定したもので定格力率は(1), (2)の値より小さくして設定した。したがって、定格電流は最適電流値に近い値になっていて、その時のアーク電力はほぼ最大になっている。グラフには炉用変圧器入力電力、アーク電力、アーク電圧を各相別に、また

- (1) 電源インピーダンス零で、1 炉だけの場合。
- (2) 電源インピーダンスを接続し、他負荷と1 炉の並列運転
- (3) (2)で炉を3 炉にした場合。

の3通りで計算した。使用した回路定数は Table 3 に示すが、この結果から回路定数とアーク炉電気特性の関係を知ることができる。(1)は理想的電源を持つ場合で、(2)はこれを現実の工場に近づけた場合である。

炉用変圧器の一次電圧と三相力率を記入した。電圧、電流、電力はすべて定格値を100%として記入した。

4. 3. 1 電源インピーダンス零で1 炉だけの場合
炉回路が不平衡になっている場合、各相に等電流を流せば Fig. 9 に示すようにアーク電力は各相不平衡

Fig. 9. Electrical characteristics of arc furnace.

Fig. 10. Electrical characteristics of arc furnace.

になり、電流値が増加すれば各相アーク電力の差は大きくなる。この差を少なくする方法としては、各相に不平衡電流を流すことである。電力平衡化の一例として $I_a : I_b : I_c = 1 : 1.15 : 1$ の場合を Fig. 10 に示す。

両図を比較してみると、定格電流値で Fig. 9 では A 相、C 相のアーク電力は約15%の不平衡が現われているが、Fig. 10 ではアーク電流の変化に対し、A 相、B 相の電力は大体等しく、C 相がこれより2~3%高くなり、アーク電力は平衡に近い状態にあることがわかる。したがって、このような操作が実現できれば炉壁ホットスポットは減少することが予想される。

Fig. 10 は電流比が $1 : 1.15 : 1$ の場合であるが、更に $I_a : I_c$ の比も変化させ、三相アーク電流に適当な値を選べば、Fig. 10 よりもっとアーク電力を平衡化することが可能であろう。

4. 3. 2 電源インピーダンスを接続し、他負荷と1炉の並列運転の場合

実際の製鋼工場はアーク炉1基のみが運転されているのではなく、動力や複数のアーク炉が受電変圧器に並列接続されている。最も簡単な回路図として Fig. 11 を考えればよい。この場合も 4.3.1 と同様で基本式として (4. 3) 式を用いればよい。ただ並列負荷とか電源インピーダンスが入ってくるので、Fig. 4(a) の炉用変圧器が電源側の定格電圧を保持している点、例えば発電所とか変電所まで下ったと考えればよい。

Fig. 11. Single-line diagram of an arc furnace plant.

Fig. 11 の場合は発電所で定格電圧が保持され炉用変圧器までの間に送電線、受電変圧器が入りアーク炉と並列に、他の負荷が入っているだけで基本的には Fig. 4 (a) と同じである。この回路をそのまま交流計算盤に組立てればよい。

炉回路定数とアーク電流は4.3.1と同じ条件にし、

(1) 電源インピーダンスと並列負荷による電源電圧の降下とそのアーク特性への影響。

(2) アーク炉不平衡回路の電源への影響。

の2点を4.3.1と比較してみた。結果を Fig. 12, 13 に示す。

並列負荷と電源側インピーダンスによる電源電圧の降下が約7%現われている。この結果から次のようなことが明らかになる。

(1) アーク電流の増加にともない炉用変圧器一次電圧は3~4%降下してくる。

(2) 4.3.1 と比べアーク電力は全体に相当低くなり、最大電力を与える電流値も小さくなっている。また Fig. 13 と Fig. 10 を比較すると、アーク電力の大きさの順が略っている。

(3) 4.3.1 と同様アーク電力は Fig. 12 では不平衡は大きい、Fig. 13 では数%の不平衡になっている。

(4) しかし炉の入力電力についてみれば、アーク電力の平衡化とは反対に、電流を増加すればその差は拡大する。

(5) 受電変圧器一次電圧の正相分、逆相分の比から求めた電圧不平衡率は0.2%以下である。

以上全体として

a) 大きな電力を使用する時は電源インピーダンスの影響は無視できない。

b) 電源電圧降下が大きい程アーク電力最大点の力率は大きくなることを操業上注意しなければならない。

c) Fig. 6 のベクトル図からも明らかであるが、相互インダクタンスの不平衡のため実効抵抗が変化して、炉の入力電力とアーク電力は大きな差を生じている。操業上アーク電力の測定は困難なので電流設定は相互インダクタンス不平衡を十分考慮して決定しなければならない。

d) 電源電圧の少しの変動がアークには大きな影響を与え、一定電力投入の維持を困難にする原因の一となっている。特に同一の受電変圧器でアーク炉を並列運転する場合、他のアーク炉の影響を受けやすいということになる。

e) 不平衡回路の電源への影響については電流電圧とも、問題になるほど不平衡率は現われない。複数のアーク炉を並列運転する場合は結線を順次ずらせばもっと不平衡率は小さくすることができる。

4. 3. 3 4.3.2で炉を3台にした場合

計算条件を次のように決めた。

Fig. 12. Electrical characteristics of arc furnace.

Fig. 13. Electrical characteristics of arc furnace.

- (1) Fig. 11 を少し修正して Fig. 14 で考えた。3 台のアーカ炉の相順は同じであるが順次相をずらせて結線し、電源電圧の不均衡率を小さくするようにした。

Fig. 14. Single-line diagram of an arc furnace plant.

- (2) 2号炉, 3号炉は同一特性, 1号炉はそれらの2倍の電気容量でUHP操業とした。
 (3) 回路定数の不均衡は Table 3 に示すように1号炉は小さく, 2号, 3号炉は大きい。
 (4) 2号, 3号炉は定格電流の120%位で等電流運転している。

Fig. 15. Electrical characteristics of arc furnace.

(5) 以上の条件で1号炉に等電流を流した場合の1号炉についての電気特性を Fig. 15 に示す。

Fig. 15 の結果は基本的に4.3.2と同じであるが、

- (1) 三相導体間の相互インダクタンスを平衡化し、回路全体を平衡に近ずけた効果として、Fig. 12 にくらべてアーク電力の不均衡は10%以下になり、アーク電流を変化させても入力電力とアーク電力の平衡状態はほぼ維持されている。
- (2) 3台のアーク炉と電源の接続を順次ずらせた効果として、受電変圧器一次における電圧不平衡率は0.2%以下、電流不平衡率は0.7%になっている。

4. 3. 4 計算のまとめ

アーク炉不平衡回路を解く方法として、アナログ機器の特長を生かした交流計算盤を使うことは容易に、かなり良い近似で回路全体を模擬でき、操作も割合に簡単という利点を持つ。その結果は

- (1) 変圧器など電源設備の選定資料、
- (2) 最適な電流、電圧条件を決める操業指針等に役立つ。

実際の工場について解析するためには実状に即したデータが必要であり、時間的な変化を考慮に入れることが大切である。

5. 炉用変圧器の諸元

アーク炉を三相平衡回路として扱う場合 (3.3) 式から次式が導き出される。

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{IX}{(\%IX)} \times 100 \\ \%IX &= \sqrt{1 - \cos 2\theta} \times 100 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\text{変圧器容量 } P_0 = \frac{3I^2X}{(\%IX)} \times 10^{-3} (kVA) \dots\dots\dots (5.2)$$

以上の式から $\%IX$ 、 X および I が決まれば炉用変圧器の諸元が算出できる。HPあるいはUHPを考える場合には前述のごとく耐火物の摩損が少なく、しかも大電力を投入するため大電流、ショート・アークとする必要から力率がほぼ75%になるような運転となり、 $\%IX$ も大体66%とほぼ一定値となる。したがって、変圧器容量を増大させるためには、(5.2)式から明らかなように、電流を増すか炉の回路リアクタンスを増すが必要である。逆にいえば、変圧器容量を制限するのは電流および回路リアクタンスの大きさということになる。いま、ある変圧器を k 倍する場合、電流あるいはリアクタンスのいずれか一方のみで行うとする。この両者の優劣を比較するには、大電力操業における重要な問題点であるホットスポットの大小を考

慮することが必要である。同一大きさの炉ではホットスポットの大きさは前述のごとく、(アーク電力) $\times$ (アーク電圧) $= (Q \times E)$ に比例すると考えられる。ここに Q および E は (3.1) 式を変形した次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{3}{2} \times \left(\frac{E^2}{X} \right) \times \tan \frac{\theta_s}{2} \times 10^{-3} \text{ (kW)} \\ E &= V \frac{\sin (\theta_s - \theta)}{\sin \theta_s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.3)$$

R および X を一定にしておいて、電流の増加で変圧器容量を k 倍にするとすれば電流 I 、電圧 V は $\sqrt{k}$ 倍になり、また θ_s および θ が一定であることから、 E も $\sqrt{k}$ 倍、 Q は k 倍になる。いっぽう、 X の増加のみによるときは、電圧 V は k 倍、 Q と E については普通の場合には θ_s が大体 80° 前後であることから、 R が変らず X 分のみ増しても θ_s はそれほど増加せず θ が一定であることから、 $\tan (\theta_s/2)$ 、 $\sin (\theta_s - \theta)/\sin \theta_s$ はともに若干の増減があるのみで、 V の増加に比べてはるかに少ないので、 Q 、 E ともに k 倍になると考えても大差はない。したがって、 X を大にする方法は電流を増す方法にくらべてアーク電圧および耐火物摩損指数がほぼ $\sqrt{k}$ 倍となり、力率が75%であるとはいえ好ましい方法ではなく、できる限り低く抑えることが望ましい。以上のことから、大電力アーク炉を実現する上で最も重要なことは電極に対してどれだけ電流を流しうるかということであり、換言すれば最近の大電流用電極の開発がHP、UHPを可能にしたということが出来る。なお電極の許容電流については別掲の電極に関する論文を参照されたい。 X については炉用変圧器二次端子以降の電極を含む炉体のリアクタンスと、炉用変圧器のリアクタンス (小形炉でリアクトルがある場合のリアクタンスも含めて) とを含めた値をとるのであるが、このほか一定電源電圧が得られる受電点以降、炉用変圧器までのリアクタンスも考慮に入れることが必要である。

以上は平衡回路について考察したのであるが、不平衡回路についても前述を1相分として扱うことで基本的考察は可能である。二次電圧を実際に選定するに当っては炉の操業時のリアクタンスの変動、電源状況の変化などを加味して定格値に巾を持たせることが通常行なわれる。

Table. 4 に最近の大電力アーク炉の変圧器容量および電極径の一例を示した。

Table 4. Transformer capacity and electrode diameter for recently high-powered arc furnace.

Indicated capacity (ton)	Shell inside diameter (mm)	Transformer capacity (kVA)	Electrode diameter (inch)
1	1,829	1,500	6
2	2,134	2,500	7~8
3	2,438	3,500	9
5	2,743	5,000	10
8	3,048	6,250	12
10	3,353	7,500	14
15	3,658	10,000	14
20	3,962	12,000	16
25	4,267	15,000	16
30	4,572	18,000	18
40	4,877	22,000	18~20
50	5,182	25,000	20
60	5,486	30,000	20
70	5,791	35,000	20
80	6,096	40,000	20
125	6,706	50,000	24
175~200	7,315	65,000	24
200~250	7,620	80,000	24

6. 電力水準と生産性

W.E.Schwabe はその論文²⁾において電力水準の溶解能力におよぼす影響に関し、簡単化した条件、すなわち、通電中の電力は常に一定であり、電気効率（炉内に投入される有効エネルギーと炉用変圧器一次側に供給される全エネルギーの比）も一定とし、かつ通電休止時間を30分とした場合をもとにして試算している。まず、炉の熱抵抗から温度対時間の指数関数曲線をえがいて、溶解時間ならびにkWh/tを求め、この結果を使ってt/hを算出表示した。しかし、実際の製鋼作業における電力投入状況は溶解期と精練期で異っているばかりでなく、溶解期においても常に一定電力がかけられているわけではない。すなわち、炉用変圧器の最大容量に見合う電力は溶解期のうち、通電初期の電極が炉底に達するまでのポーリング時期を除いた時間のみであって、精練期は変圧器容量とは無関係に小電力が投入され、その時間も鋼種により変わるのが普通である。したがって、電力水準が生産性におよぼす影響を考える場合、一般的には溶解期の最高電力負荷時

のみを採るのが妥当である。いっぽう、この期間でも熱精算的には次のような複雑な諸要素がある。すなわち、入熱では供給電力以外に電極の酸化熱、材料の化学反応熱と顕熱、炉壁から材料への熱伝達などがある。また、出熱には鋼の加熱溶解とスラグ加熱の有効熱、冷却水損失、炉体表面からの放散熱、逸出ガスの持去る熱損失、追加装入時の放熱損失、変圧器および電気回路中の電気損失などがある。これらすべてを考慮して正確に熱精算することは難しいので、ここでは以上の熱的諸要素を総合簡略化して、変圧器一次側からみた供給電力に対する全熱効率として扱った。また熱損失全体は単に時間に比例するものとして電力水準と生産性との関係を考察することにした。

いま変圧器容量 P_0 kVA のアーク炉の溶解期電力負荷曲線を Fig. 16 とする。この場合、 t_1 , t_2 , t_4 時間およびこれら時間中の電力は、耐火物保護などの見地から変圧器容量の大小とは関係なく、炉の大きさ、スラグの質などにより一定と見なして差支えない。溶解時間に関係するのは t_3 および t_5 時間の最高電力負荷時のみである。ここにおいて変圧器容量を P_0' に変

Fig. 16. Typical power loading curve during meltdown in an arc furnace.

えた場合 t_3 および t_5 時間はそれぞれ t_3' および t_5' 時間になったとすると、この時間内における投入電力の有効分が等しいと仮定することから次式が成立する。

$$P_0 \cdot \cos \theta \cdot \eta \cdot t = P_0' \cdot \cos \theta' \cdot \eta' \cdot t' \quad (6.1)$$

ただし

P_0, P_0' : 変圧器容量 (kVA)

$\cos \theta, \cos \theta'$: それぞれの変圧器の場合の力率

η, η' : それぞれの変圧器容量における全熱効率 (%), すなわち、装入材の正味溶解熱量に対する溶解期投入電力量の比

$$t = t_3 + t_5 \quad (\text{min})$$

$$t' = t_3' + t_5' \quad (\text{min})$$

$$\text{いま } P_0' = nP_0 \quad (6.2)$$

として (6.1) 式を変形すれば

$$t' = \frac{1}{n} \cdot \frac{\eta \cos \theta}{\eta' \cos \theta'} t \quad (6.3)$$

$$t - t' = \left(1 - \frac{1}{n} \cdot \frac{\eta \cos \theta}{\eta' \cos \theta'} \right) t \quad (6.4)$$

が得られる。(6.3) と (6.4) 式においては η' が既知であることが必要であり、 η' が未知の場合は次式による。ただし、 G は炉の熱損失とする。

$$(P_0 \cos \theta - G) t = (P_0' \cos \theta' - G) t' \quad (6.5)$$

$$G = (1 - \eta) P_0 \cos \theta \quad (6.6)$$

この両式から

$$t' = \frac{\frac{\eta \cos \theta}{\cos \theta'}}{n - (1 - \eta) \frac{\cos \theta}{\cos \theta'}} t \quad (6.7)$$

$$t - t' = \left\{ 1 - \frac{\eta \cos \theta}{n - (1 - \eta) \frac{\cos \theta}{\cos \theta'}} \right\} t \quad (6.8)$$

が得られる。 η は従来の実績から大体 0.82~0.92 である。

いま一例として $\eta = 0.87, \cos \theta = 0.8, \cos \theta' = 0.75$ のとき、 n を変えた場合の n と t'/t の関係を図示す

Fig. 17. Reducing of maximum power load time during meltdown vs. increasing of transformer capacity.

ば Fig. 17 のようになる。

このように得られた t および t' に対し、それぞれ 1 チャージ中の他の時間、すなわち、溶解期低負荷電力時、スクラップ装入、酸化および還元、出鋼および補修の各時間を加えた 1 チャージの全時間を T (min) とし、炉容量を $C(t)$ とすれば、生産性 $Y(t/h)$ は次の式から得られる。

$$Y = \frac{60}{T} C(t/h) \quad (6.9)$$

以上は W. E. Schwabe とは別の見方から電力水準と生産性について述べたものであるが、この手法においてもかなり大胆な仮定を用いているため、実際との間にそれなりの誤差を生ずることは避けられない。

7. フリッカ

一般にアーク炉では電流が不規則な時間的変動をくり返す。特に溶解期の初期および追加装入直後においては、スクラップと電極の相対的位置の変化が激しいため、電流の変動も著しい。もちろん、自動電極調整装置により電流が一定になるよう追従制御しているが、電極昇降機構に慣性があるため、電流の速い変動を押えることはできない。したがって、電源インピーダンスによる電圧降下が炉電流の変化にともなって変動し、供給変電所母線の電圧が時々刻々変化するもので、同じ母線から供給されている電灯などの明るさが増減し、眼にちらつき感を引き起こして不快に感ずるようになる。これを照明フリッカと呼んでいる。アーク炉でフリッカが問題になるのは、主として溶解期で

あって、精練期は電流の変動がほとんどないので、フリッカの対象にはならない。

(A) Curve reported by Utilities Coordinated Research Inc.

(B₁)(B₂) Curves based on the test by three(Tokyo, Chubu, Kansai) Power Companies

{(B₁): Flicker feeling ratio equals 80%

{(B₂): Flicker feeling ratio equals 100%

Fig. 18. Borderline of flicker visibility.
(For incandescent lamp)

電圧が変動する場合、照明フリッカの限界曲線としては白熱電灯を基準にした Fig. 18¹¹⁾がよく用いられる。60Wの白熱電灯のちらつきを、100人中何人が「ある」と感じ、または「うるさい」と感じるかの割合(認識率)で示したものを Fig. 19¹²⁾に示す。この図をもとにして、アーク炉の溶解期1時間中の電流変動の実測値を ΔV_{10} に換算した値の平均値と、最大値に対する推奨許容値として電気協同研究会の照明フリッカ基準値専門委員会が出している値は ΔV_{10} 最大値

Fig. 19. Flicker feeling curve of electric arc furnaces.

0.45~0.83, 平均値 0.32~0.63 (いずれも 100V に対する %) であり、各電力会社はそれぞれの実情に応じてこの値のなかより限界値を選んでいる。以上において、 ΔV の読み取りは Fig. 20 の通りであり、電圧フリッカの周波数とちらつき感との関係は Fig. 21²³⁾ のよ

Fig. 20. Waveform of line voltage.

Fig. 21. Equivalent flicker feeling coefficient.
(on 60W incandescent lamp)

うで、各周波数の ΔV を ΔV_{10} に換算するのに使われる。

一つの工場に2基以上のアーク炉がある場合、あるいは、同一供給変電所母線にいくつかのアーク炉が接続されている場合の、供給母線における総合電圧変動 ΔV_s は、一般に次式のように4乗根則で表わされる。

$$\Delta V_s = \sqrt[4]{(\Delta V_A)^4 + (\Delta V_B)^4 + (\Delta V_C)^4 + \dots} \quad (7.1)$$

したがって、炉数が多くなる割合に電圧変動は大とならない。(7.1) 式はまた電圧変動の原因である無効電力の変動量 ΔP_{kVar} についても成立する。したがって、同一炉が2~3基ある場合には1基の場合にくらべて ΔV_s はそれぞれ $\sqrt[4]{2} = 1.19$, $\sqrt[4]{3} = 1.32$ 倍になり、大きさの異なる炉が数基ある場合には、それらの炉のうちで ΔP_x の大きいものによって ΔV が支配されることも明らかである。

このような電圧変動は電源の容量に関係するもので、炉の変圧器容量に比して電源の容量が小さい場合にはフリッカとしての苦情が生ずる。これを見分ける目安としてよく使われるアメリカのAIEEが発表した X_{mn} 曲線を Fig. 22 に示す。図の縦軸は相互降下定数 X_{mn} といい、炉用変圧器定格電流に等しい電流が流れたとき、電源インピーダンスによって生ずる電圧降下(単位法)を示す。なお、他の一例としてその供給区域内に 48MVA アーク炉*を有する Commonwealth

* 筆者註: 文献では明記されていないが、Northwestern Steel & Wire Co., と解せられる。

Fig. 22. Relation between furnace transformer capacity and mutual drop constant in AIEE.

Edison Co., Chicago, Ill. の P.J. Fenoglio が発表した論文¹⁴⁾中の炉用変圧器容量と電源短絡容量との関係図を Fig. 23 に示す。この図はアーク炉のHPあるいはUHPに関してかなり参考になる。

他の予測法の一例としては、炉の無効電力の最大変動量 $\Delta P_{x\max}$ kVar (三相換算最大変動分) から電圧フリッカ最大値 $\Delta V_{\max}$ (%) を計算し、これをある基準値 (概略2%前後) と対比して問題の有無を検討する方法がある。

$$\Delta V_{\max} = \frac{\Delta P_{x\max}}{S} \times 100 \text{ (}\%) \text{ (7.2)}$$

ここにSは供給母線の三相短絡容量 (kVar) で、 Δ

Fig. 23. System short circuit capacity and furnace transformer sizes.

$P_{x\max}$ は炉用変圧器の定格電流時と、炉の短絡時における変動巾である。

HP, UHPは前章に述べたごとく大電流によるショート・アークの操業が条件であることから、溶解期の力率も従来の90%前後にくらべ75%前後で低いこ

と、すなわち、%リアクタンスが大きなることであり、したがって、無効電力の最大変動量はかえって減る傾向にあることや、アークがより安定で電流の変動が少ないことなどが当然考えられるので、フリッカ問題に対しては有利な方向と判断される。

8. あとがき

アーク炉のHP, UHP操業に対して検討を加えたが、電気的見地からは、最適電流を基準とした力率75%付近での操業が有効であり、電力増加は主として電流増加による方が優れている。新しい測定技術や計測機器の進歩によって、アーク炉特性の解析も急速に進みつつある。大電力を投入するために増加させ得るアーク電流の上限値は、主として使用する電極の特性に左右されるので、大電流に耐える電極の開発がますます進むことが特に望ましい。また、炉壁ホットスポット問題軽減のためには、炉回路母線の三相平衡化を促進する必要があるが、他方で耐火物の改良進歩が期待される。さらに、フリッカや電圧降下を防いで高生産性を遂行する意味から、電源の強化が主要な課題となっている。

すなわち、アーク炉のHP, UHPによる生産性の向上は、今後の、計測技術の進歩、電極の開発、電源の強化などに負う所が大きい。

なお、三相不平衡回路の解析に際し、ご指導下され、さらに研究室の交流計算盤を貸して下さった名古屋大学工学部市川真人教授に厚く御礼申し上げます。

〔文 献〕

- 1) W.E. Schwabe & C.G. Robinson : AIME, Electric Furnace Conference, 22 (1964) 114
- 2) W.E. Schwabe & C.G. Robinson : AIME, Electric Furnace Conference, 24 (1966)
- 3) 電気学会 : 電熱工学 (1960), 10
- 4) 電気学会 : 放電現象 (1962), 146
- 5) 滝波, ほか : 電気製鋼, 38 (1967) 6, 329
- 6) 百田恒夫 : 電気試験所研究報告, 第503号 (1949)
- 7) 林, 野田 : 鉄と鋼, 23 (1937) 1
- 8) W.E. Schwabe ; Vth UIE, N. 123 (1963)
- 9) W.E. Schwabe ; Iron & Steel Eng., Year Book (1961), 1048
- 10) N. Hermont ; Vth UIE, N. 115 (1963)
- 11) 電気学会 : 電気工学ハンドブック, (1967), 317
- 12) 電気学会 : 電気工学ハンドブック, (1967), 1415
- 13) 電気学会 : 技術報告, 第69号, (1965), 17
- 14) P.J. Fenoglio ; J. of Metals, 19 (1967) 4, 60