技術資料

製鋼用アーク炉の電磁障害と対策

和泉喜久磨*

EMI and Countermeasure for Electric Arc Furnace in Steelmaking

Kikuma Izumi

Synopsis

An electric arc furnace in steelmaking which melts scraps by arc heating, is one of the most important equipments in recycle system for iron and steel.

At present the product of electric steelmaking is about 30% of the crude steel.

Toward the 21st century, the necessity of electric arc furnace becomes large in order to recycle scraps in clean environment.

In this paper the problem about Electro-Magnetic Interference of electric arc furnace in steelmaking, and countermeasure for these problems are described, such as flicker, harmonic waves and magnetic effect.

1. はじめに

21世紀に向かって「廃棄物」を「クリーン」に「リサイクル」することが大きなテーマとして注目をあびており、それに伴い電磁気障害(EMI)に対しても、近年関心が高まってきた。

製鋼用アーク炉は、産業廃棄物であるスクラップを、アーク加熱により溶解し、成分を調整することにより新しい鋼とする鉄リサイクルの主要設備の1つである。

また、1990年の製鋼用アーク炉における生産量は、約3500万トンに達した。これは前年比5%の増加で、全粗鋼生産量の約32%に当り、1980年以後は、スクラップ蓄積量の増大などもあり漸増傾向は依然として続いている。

本稿では、製鋼用アーク炉の電磁障害とその対

策について、従来からの交流アーク炉(AC炉)と最近注目を集めている直流アーク炉(DC炉)を比較して整理した。

2. 交流アーク炉と直流アーク炉

製鋼用アーク炉は、大別して、装入原料溶解の容器としての炉体とアーク熱供給源の電気設備で構成され、供給電源の区別によりAC炉とDC炉に区分される。

AC炉は三相交流を3本の上部黒鉛電極に印加し、炉内に装入された被溶解物(スクラップなど)を中性点として被溶解物として上部電極との間にアークを発生させ、その熱によってスクラップを溶解させる。

一方、DC炉は、三相交流をサイリスタ整流装置により直流に変換し、上部黒鉛電極と炉体底部に設置した炉底電極との間にその直流電圧を印加し、被加熱物を介してアークを発生させスクラップを溶解する。

1991年4月22日受付

*大同特殊鋼㈱機械事業部

製鋼用アーク炉は、現在大半がAC炉である。DC炉は、開発段階にあり、国内では1991年4月現在6基稼動しており、最大のは溶鋼重量130トン、炉かく内径7.0m、変圧器容量100MVAの炉が実用化されている。AC炉に比べて、DC炉の利点が多いことが注目を集めており、計画中的のアーク炉のほとんどがDC炉であることから、2～3年内には15基を超えると予想される。

表1に製鋼用アーク炉電気設備の構成をAC炉とDC炉を比較して示す。

3. アーク炉の電磁障害とその対策

製鋼用アーク炉は、産業廃棄物をリサイクルする素晴らしい機能を発揮し社会に貢献している。し

かし、同時に電磁障害も発生するため、その対策の設備に、アーク炉設備と同程度の設備費用が費やされる。

表2にアーク炉の発生する電磁障害とその対策のための設備を整理した。

3.1 伝播性電磁障害

アーク炉の負荷変動は、電力系統に各種の影響を与えるスクラップを加熱するためのアークの発生が、電極とスクラップの距離やそれからの状態が変化すると不連続となり、そのため電流および電圧の波形が不規則になったり、電力が急激に変化したりして、電力系統に悪影響を与える¹⁾。図1にアーク炉の電圧、電流、電力の測定例を示す²⁾。

上記に述べたアーク炉の問題点を整理すると以

表1 DC炉/AC炉電気設備構成

項 目		DC炉	AC炉
特 高 機 器		炉用VCB 避雷器/サージ吸収器	炉用VCB 避雷器/サージ吸収器
電 源		整流器用変圧器 サイリスタ整流器 直流リアクトル	炉用変圧器
タップ切換装置		無電圧タップ切換装置 または 負荷時タップ切換装置 (5～10点)	負荷時タップ切換装置 (5～10点)
二 次 導 体		大電流母線 (直流用陽極側、陰極側)	大電流母線 (AC三相分)
電 極	上 部	黒鉛電極 1本	黒鉛電極 3本
	炉 底	水冷ピレット式 1～数本 ケラー式 1式 (ピン60～200本)	なし
電極昇降装置		電動機式 液 圧 式	電動機式 液 圧 式
制 御 監 視 盤		監 視 盤 サイリスタ制御盤 DC制御盤 低圧動力盤 電極制御盤 計器制御盤	監 視 盤 低圧動力盤 電極制御盤 計器制御盤
そ の 他		力率改善コンデンサー } 兼用 高周波フィルタ } (フリッカ制御装置)	力率改善コンデンサー } 兼用 高周波フィルタ } フリッカ制御装置

表2 アーク炉の電磁障害とその対策

ノイズ分類	障害内容	障害原因	アーク炉における対策設備
伝播性	低力率	力率が悪く 特性が非線形	力率改善設備
	高調波	電圧・電流が歪波形	高調波フィルタ
電磁障害	フリッカ	電流、電力が 時々刻々不規則に 急激な変化をする	フリッカ補償装置
近傍放射性 電磁障害	磁界	大電流による 磁界発生	絶縁対策（交流磁界） 磁化防止（直流磁界） シールド

図1 アーク炉の電圧、電流、電力の実測例

下のようなになる。

- (1) 負荷率が悪い
- (2) 力率が悪く、力率・電流特性が非線形である。
- (3) 電流が歪波形である。
- (4) 電流、電力が時々刻々不規則に急激な変化をする。
- (5) AC炉においては、三相各相が不平衡になる。

3.1.1 フリッカ発生量

負荷変動による電源電圧の変動は、照明、テレビ、コンピュータ、機械装置などに対して、それ

ぞれ異なった悪影響を与えるはずである。しかしそれらに対する量的な解析も複雑であるため、まずは照明、テレビの明るさのちらつきを対象にし、これをフリッカ（Flicker）と呼んでいる。

人間の目が一番ちらつきを強く感ずる電圧動揺の周波数は8～10Hzであり、そのため10Hz正弦波動揺に対する規制が実施されている。

図2にAC炉とDC炉のフリッカの測定例を示す²⁾。

これは、DC炉のフリッカがAC炉の約50%となることを示しており、DC炉の利点といえる。

この測定結果は、理論的に以下のように説明で

図2 フリッカー比較

きる。

系統インピーダンス $Z_s = R_s + jX_s$ の電源にアーク炉負荷を接続した場合、アーク炉一次側の母線電圧動揺は、下式で表わされる。

$$\Delta V \approx R_s \cdot \Delta P + X_s \cdot \Delta Q \quad \dots\dots(1)$$

ここで ΔP : 有効電力の変動

ΔQ : 無効電力の変動

R_s : 電源の抵抗

X_s : 電源のリアクタンス

一般に、電源の系統インピーダンスは、 $R_s \ll X_s$ である。したがって ΔV は X_s と ΔQ が支配的となるため、一般に(1)式の代りに(2)式を用いてフリッカが検討される。

$$\Delta V \approx X_s \cdot \Delta Q \quad \dots\dots(2)$$

同じ電力系統に同じ変圧器容量の AC 炉と DC 炉を設置した場合、(2)式において、 X_s が同じであるから ΔQ が問題となる。

一方、AC 炉および、電流一定制御を実施した場合の DC 炉の有効電力 (P) および無効電力 (Q) の関係は、(3)式、(4)式のようになる^{3),4)}。

$$(\text{AC 炉}) \quad (P^2 + (Q - A)^2 = A^2 \quad \dots\dots(3)$$

$$(\text{DC 炉}) \quad P^2 + Q^2 = T^2 \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $A = 3V^2/2X$

V : 無負荷時二次相電圧 (V)

図3 有効電力-無効電力特性

X : 回路リアクタンス (Ω)

T : 変圧器容量 (kVA)

この(3)式、(4)式をグラフにしたものを図3に示す。

3.1.2 フリッカ補償装置

表3にフリッカ補償装置の分類を示す。

上記(2)式において ΔV を小さくするためには、 X_s を低減させる方法と、 ΔQ を補償する方法がある。

表3 フリッカ補償装置の分類

設置場所	補償の考え方	補償の方法	補償の方式
電源側	電源リアクタンスの補償	専用供給 電圧の格上げ 直列コンデンサ方式 三巻線補償変圧器方式	系統変更
負荷側	母線電圧降下の補償	ブースタ（昇圧器）方式 相互補償リアクトル方式	直列補償
	アーク電流変動の補償	直列リアクトル方式 直列可飽和リアクトル方式	
	無効電力変動の補償	同期調相機と緩衝リアクトル方式 並列可飽和リアクトル方式 サイリスタ型コンデンサ開閉方式 サイリスタ型リアクトル制御方式	並列補償

表4 アーク炉高調波発生予測量

アーク炉分類	実効値観測時間	基本波	2	3	4	5	6	7	11	13	17	19
AC炉	2秒	100%	20.4	18.9	8.2	8.2	3.9	3.1				
	20秒	100%	9.9	13.1	4.9	5.8	2.6	2.2				
	2分	100%	7.4	9.1	3.5	5.0	1.9	1.9				
	10分	100%	5.7	7.2	2.5	4.3	1.5	1.7				
DC炉 (6相整流)		100%	1.0	1.0	1.0	20.0	1.0	14.3	9.1	7.7	5.8	5.3

専用線化, 電圧格上げなど X_s そのものを低減させるもの, 負性リアクタンスを接続し, 次式

$$\Delta V = (X_s - X_c) \Delta Q \quad \dots\dots(5)$$

のように X_s を低減させる方法があるが, これらの方法は母線より電源側で設置しなければならないので, 変動の発生源で処理できない欠点がある。しかし, ΔQ を補償する並列補償型のコンデンサ開閉式などは, フリッカを発生源で処理できる長所があり, 現在一番多く使用されている。

補償された母線電圧変動は, (6)式となる。

$$\Delta V = X_s \cdot (\Delta Q - \Delta Q_c) \quad \dots\dots(6)$$

ここで, ΔQ_c : 補償装置が吸収する無効電力変動

3.1.3 高調波発生量

安定状態の AC 炉においても, アーク電圧, アーク電流は, 正弦波波形に比べて乱れた波形になっているため, 相当の高調波分を含んでいること

になる。また, それに加えてスクラップ溶解による急激な放電距離の変化, 雰囲気ガスの流れ, 溶鋼の揺動などの影響を受けてさらに複雑になっている。

一方 DC 炉においても, サイリスタ整流装置において, サイリスタ点弧角を制御し直流電流一定制御を行っているため, 供給側の三相交流は高調波を含んでいる。

AC 炉および DC 炉の高調波予測発生量を表 4 に示す。

AC 炉の高調波予測発生量が, 日本電熱協会アーク炉委員会レポート (1988年) で数多くのデータにより決定された。DC 炉の高調波予測発生量は, 6 相整流の整流装置の理論値である。

表 5 に DC 炉の高調波測定例を示す。測定に使用した炉には, 定格直流出力 9.8MW, 定格直流電流 40kA の 6 相整流装置が設置されている。

表5 DC炉高調波測定データ

測定時期	カウンタ値	基本波	2	3	4	5	6	7	11	13	17	19
	理論値	100%	1.0	1.0	1.0	20.0	1.0	14.3	9.1	7.7	5.8	5.3
溶解初期	30	100%				17.8		7.9	5.3	6.3	1.3	1.5
溶解変動期	42	100%				15.8		9.4	4.0	2.7	1.3	1.2
溶解期	60	100%				15.8		7.5	3.8	3.2		
精錬期	625	100%				17.8		10.0	5.0	2.1	1.0	1.7
精錬期	650	100%				17.8		11.2	4.5	4.0	1.6	1.0

DC炉：6相整流，定格直流出力 9.8MW，定格電流 40kA

AC炉はDC炉に比べて，第2～第5の低次領域で大きな値を示すが，7次以上の高次については小さくなる。

3.1.4 高調波対策

高調波発生量に関しては，各次調波および総合に対し，電圧歪率の規制が設定されており，下記に示すような高調波対策が実施されている。

(1) 高調波フィルタの取り付け

対象高調波に対して低インピーダンスとなるLC回路を設置し，高調波を分流し，電源側流出量を削減させる方法

(2) サイリスタ整流装置の高パルス化

サイリスタ整流装置を12相，24相などの高パルス整流を導入することにより，整流装置が発生する高調波発生量を削減する方法

(3) 運転時の制御遅れ角低減

整流器用変圧器に負荷時タップ切換器を設備し，運転時の設定電圧に応じたタップ電圧を選定することにより，サイリスタの点弧角を正弦波に近い角度で制御させて高調波を低減する方法

(4) 受電電圧の格上げ

受電電圧を高電圧化することにより基本波電流を低減し，電圧歪率を低減する方法

3.2 近傍放射性電磁障害

3.2.1 アーク炉の発生する磁界

AC炉では500～600V，50～60kAの三相交流を用い，DC炉では300～600V，30～120kAの直流を取り扱うため，いずれも大電流がもたらす強磁界による電磁障害が発生する。

図4にAC炉⁹⁾，図5にDC炉における磁界の測定結果を示す。

AC炉の場合の交流電流は，時々刻々大きく変

化するため，正確に計算することは困難である。しかしDC炉においては，直流電流一定制御を行っているため磁界計算はAC炉に比べて計算誤差が少ないものになる。

上部電極および炉底電極に電流を導く二次導体の配置を考慮し，Biot-Savartの法則を用いて磁界の強度を求めることができる。測定例が数少ないので十分な確認はとれていないが，ほぼ磁界測定結果と一致すると思われる。

また，AC炉，DC炉共にアーク柱自体が，二次導体回路および電極が発生する磁界によりアンペールの力を受けて斜行していることがよく知られている。

3.2.2 アーク炉発生磁界対策

上記で述べたアーク炉が発生する電磁障害に対しては，アーク炉全体を遮へいすることは構造的に不可能であり，個別に対策を実施することになる。

周辺の構造物に対しては絶縁対策が実施されている。AC炉においては電磁誘導による加熱を防ぐため無筋範囲の設定や，閉ループを作る構造物の回避が行われている。

また，DC炉においては，直流磁界による磁化を防止するため，一部の部品はステンレス鋼を使用するなどの注意が払われている。

3.2.3 エレクトロニクス製品の磁界対策

アーク炉が発生する磁界から，操作室内など周辺に設置したエレクトロニクス製品を保護するには，磁気シールドを実施しなければならない。

設置場所および設置する方向により磁気の影響は異なる。また，アーク炉運転条件にも影響されるので，一般には設置場所での最大磁界強さを基

〈測定位置〉

〈測定結果（床上 1400mm の位置を測定）〉

チャージ 測定位置 工程		1				チャージ 測定位置 工程		2				備考
		X	Y	Z	I			X	Y	Z	I	
溶 解	A	^G 4	^G 2	^G 2.5	^{kA} (50)	溶 解	A	^G 4.5	^G 2.3	^G 2	^{kA} (50)	操作室内
	B	4	2.3	1.5	(40)		B	3	2	1	(50)	
精 錬	A	2.2	1.4	0.9	(40)		C	2.5	1.8	1	(50)	
	C	3	2.2	2	(40)		G	0.8	1	0.2	(50)	
成分 調整	B	3.5	2.2	2	(40)		H	0.4	1.5	1.8	(50)	
	C	2.5	1.5	1.1	(40)		C	3	1.6	1.8	(60)	
						追 溶 解	D	2.5	1.3	1	(60)	
							E	3	2.5	1.5	(60)	
							F	2	2.3	1.3	(60)	

G: T(テスラ)×10⁻⁴ I: 電流

図4 AC炉磁界測定結果

測定点	X (G)	Y (G)	Z (G)	I (kA)
B	5.6	0.5	0.3	19.2
C	4.8	0.5	0.5	
D	3.3	0.5	0.6	
E	2.5	0.7	0.3	
F	2.0	0.6	0.2	
A	21.1	4.8	0.5	24.1
B	10.3	0.9	1.4	
C	7.0	0.6	0.7	
D	4.2	0.7	0.7	
E	3.4	0.7	0.5	
F	2.7	0.7	0.4	
G	3.4	0.6	0.15	
H	1.9	0.55	0.6	
I	1.1	0.6	0.4	

G: T(テスラ)×10⁻⁴

図5 DC炉磁界測定結果

準値として磁気シールド対策が実施される。

磁気シールド材料としては、現在いろいろな材料が開発され使用されているが、アーク炉工場のような強磁界環境では高透磁率材料が用いられる。たとえば、VDTの磁気シールドとしてPCパーマロイが数多く使用され実績を上げている。実際の設計にあたっては、板厚および透磁率を確認し考慮する必要がある。

4. む す び

アーク炉工場における電磁障害は伝播性障害に関しては、古くから研究されており、その成果も数多く、現在ではほとんどが対策されている。しかし放射性障害に関する研究は、前者ほど進んでおらず未解決の問題も多く存在している。

21世紀に向けて「クリーンに廃棄物をリサイクルする」ためには、製鋼用アーク炉、特にDC炉は必要不可欠な設備であり、CO₂排出規制の面から

も他のシステムより優れている。今後ますますアーク炉設備は電気エネルギー密度を増大させる必要が生じる中で、EMC(電磁協調)は重要度を増しており、作業環境も含めた改善努力を関係者各位と共に続けたいと考えている。

最後に、御協力いただいた東芝および当社星崎工場ならびに商品開発部の皆様に感謝すると共に、お礼申し上げます。

(文 献)

- 1) 稲垣悦郎：アーク炉の電熱、(1984)大同特殊鋼編
- 2) T.Noda: 6th IISC Paper, 4 (1990), 200
- 3) 工業電気加熱ハンドブック〔日本電熱工学委員会〕
- 4) エレクトロヒート応用ハンドブック〔日本電熱協会〕
- 5) 和泉喜久麿：計測技術, 16 (1988) 11, 209