UDC 621.365.3-53:669.046.582

ESR コントローラ

稲垣悦郎*, 仙波忠雄*, 井上博光*

Power Controller of Electro Slag Remelting

Etsuo Inagaki, Tadao Senba and Hiromitsu Inoue

Synopsis

On ESR (Electro Slag Remelting) processes it is very important that the electrode immerses a certain amount into the liquid slag and that this amount of immersion is kept constant.

This ESR power controller is the equipment to maintain a constant distance between the electrode and the slag, even if the melting conditions change with progress of the melting.

1. ま え が き

エレクトロスラグ再溶解法が実用化されて十数年を経過し、この間、品質に影響する因子の解明と共に、溶解技術の開発も著しく発展した。

大同製鋼㈱でも渋川工場の2トン炉および1トン炉で数多くの改良が試みられ、多くの成果を上げてきた。それらの大部分についてはその都度文献などに発表されているので、ここではESR溶解技術のなかでも最も重要である自動電極制御装置、すなわちESRコントローラについて解説する。

2. ESR コントローラに要求される特性

操業スタートからホットトップ完了まで完全に自動で行えることが好ましい。すなわち

(1) スタート（コールドスタート）時

スラグを短時間に溶解できること。

(2) 定常溶解時

電極の先端がスラグ上面より極く僅か浸漬した位置に常に保たれる様に制御されること。

(3) ホットトップ時

電流の変化に対応した制御ができること。

その他、電源側のフリッカに影響されないことも必要である。

3. 制御対象の特性

電流などの諸要素を一定にして、電極先端位置をスラグ浴上面から一定の深さに保つとき、電極先端とスラグ浴間の電位差は一定の値であると考えられる。

通常電流は溶解の進行につれて減らされるので当然電極先端とスラグ浴間の電位差は下がることになる。また、電極とルツボの径の差から通常の溶解では電極は下げ方向にのみ制御されれば良いということである。

4. 制 御 方 法

電極先端とスラグ浴上面間の電位差を直接検出することは困難であるので実際には電極把持器とルツボ底板間の電位差を検出する。これを測定スラグ電圧と称することにする。

この測定スラグ電圧を設定スラグ電圧と比較して電極を制御する系を基本的な制御系の一つとする。

この制御系の基本動作はつぎのとおりである。

(測定スラグ電圧) > (設定スラグ電圧) の場合
電極を下降

(測定スラグ電圧) < (設定スラグ電圧) の場合
電極を上昇

(測定スラグ電圧) = (設定スラグ電圧) の場合
電極昇降停止

電極の昇降速度は上記の偏差をPID（比例、積分、

昭和51年5月22日受付

*大同製鋼㈱機械事業部設計部

微分) 演算したものに比例するようにする。コールドスタートはこの基本制御系によって行う。

また、電極とルツボの径の差により生ずる電極先端のスラグ上面からの離脱はこの制御系が測定スラグ電圧の上昇をとらえ電極を下げることにより避けられる。(第1図参照)

さて、設定スラグ電圧は3項で述べたとおり、溶解の進行に従って下げられるべきである。すなわち上記の測定スラグ電圧と比較する基準電圧(設定スラグ電圧)そのものが制御対象となるもう一つの制御系を構成する必要がある。

ESR コントローラはこの二つの基本的な制御系をカスケード結合することにより構成される。前者を基本制御系、後者を設定スラグ電圧制御系と称することにする。

この設定スラグ電圧制御系の基本的機能は設定スラグ電圧と測定スラグ電圧との差がある値(β とする)を超えたとき、その超えた量に比例する値だけ、設定スラグ電圧を下げることである。

この制御系の動作原理を一例をもって説明しよう。例えば、電流が減らされると測定スラグ電圧が下がることにより基本制御系が電極を上げて測定スラグ電圧を元に戻すように働く。

電極が上がるとスラグとの間にアークが発生し測定スラグ電圧が変動する。この変動幅が上記の β を超えると超えた分設定スラグ電圧を下げる。設定スラグ電圧を下げると(設定スラグ電圧) < (測定スラグ電圧) + β となり再び基本制御系の働きにより電極を下げて、測定スラグ電圧を下げる。そして(設定スラグ電圧) = (測定スラグ電圧) + β となる電極先端位置が所定のスラグ浴上面位置である。

電流を減らしたことによって下がる測定スラグ電圧の下降分が β を超えるような場合は、まず、設定スラグ電圧制御系の働きにより設定スラグ電圧が下げられるようになる。この場合、測定スラグ電圧が電流の変

化に比例した量下がるのに対し、設定スラグ電圧は β を超えた分のみ下げられるので、下げられた時点での設定スラグ電圧は基本制御系に対し設定スラグ電圧制御系の応答が充分早いときは測定スラグ電圧より β 高い値となる。

β は電極先端とスラグ浴上面との位置関係を決定するものであるが、異常外乱によっても設定スラグ電圧を下げてしまう恐れがあるので、値の決定には注意を要する。(第2図参照)

第2図 電流減少時の応答

5. 制御装置概要

第3図に ESR コントローラの基本構成の一例を示す。

第3図 ESR コントローラ制御系

回路はスラグ電圧測定回路、スラグ電圧初期値設定器、設定スラグ電圧修正回路、比較増幅器および調節器により構成される。

設定スラグ電圧修正回路は図のように電極位置設定

制 御 盤

器、パルス変換器、カウンタ、デジタル／アナログ変換器、減算器から成る。

電極把持器とルツボ底板間（アース）の電位差として検出された測定スラグ電圧は抵抗器で装置入力として適切な電圧に整圧され、さらに交流の場合には整流器で直流に変換される。

スラグ電圧初期値設定器は溶解開始時のスラグ電圧を設定するもので、溶解が始まれば直ちに修正回路が働くので設定に神経を使う必要はない。しかし低く設

定し過ると修正回路が働かないので高目に設定することが必要である。

電極位置設定器は上述の β を設定するもので、この値により電極先端とスラグ浴上面との位置関係が決定される。

修正された設定スラグ電圧と測定スラグ電圧との差から β を差引いた設定スラグ電圧修正信号はアナログ／デジタル（A/D）変換器でパルス数に変換される。理論的にはアナログ量のままで扱うことも可能であるがデジタル量での取扱いの方がはるかに容易なのでA/D変換している。設定スラグ電圧修正信号のパルスはICカウンタで積算され、その積算値はデジタル／アナログ（D/A）変換器で再びアナログ信号に戻され最終的な設定スラグ電圧修正信号となる。カウンタを採用したためコンデンサの放電のような修正信号の減少はない。

2トンあるいは1トンESRでは設定スラグ電圧の初期値は60V程度に設定される。今これをホットトップ終了時に10Vに降圧、ホットトップ時の降圧曲線を直線と見做し最短30minでホットトップを完了するのとし、さらに降圧を1V単位で行うものとするれば、A/D変換器は50Vの入力に対し、36secに1パルス出力できればよく、カウンタは、1パルス計数するのに36secかかっても良いことになる。これは現在の電子回路技術では容易なことである。

A/D変換器にはテレダインの4701型V/Fコンバータを使用している。このコンバータの変換公式はつぎのとおりである。ここで E_{in} はアナログ入力で0～10Vである。

$$\text{出力 } f = 10\text{kHz} \times E_{in}/10\text{V}$$

設定スラグ電圧初期値から修正信号を差引いた値は修正された設定スラグ電圧として基本制御系にカスケードされる。この修正された設定信号は修正信号がカウンタにより保持されているため元に戻ることはない。

上述のごとくESRコントローラの設定スラグ電圧修正信号は設定スラグ電圧を降圧する方向にのみ働く。これは3項で述べた理由によるものである。

修正された設定スラグ電圧と測定スラグ電圧との偏差は電極昇降速度の設定信号として、電極昇降制御系へカスケードされる。電極昇降制御系ではタコジェネレータなどによる速度のフィードバックにより閉ループが構成されているが、その速度偏差はさらに電極昇降機例えば直流電動機の電圧あるいは電流などとして与えられる。電機子電流などはシャント抵抗によりフ

ードバックされ過負荷を防止する。

形を、第5図に本装置を採用した制御結果を示す。

第4図に電極位置を変化したときのスラグ電圧波

第4図 スラグ電圧波形

第5図 制御結果

6. 異常外乱

上述した ESR コントローラの制御系を検討してみると種々の安全回路が必要であることがわかる。その主なものはつぎのとおりである。

(1) ディッピング

設定スラグ電圧は下げ方向のみである。制御系も設定スラグ電圧修正回路は、測定スラグ電圧と設定スラグ電圧との差が β を超えたとき、その量に比例した値を設定スラグ電圧から差引くように働く。

ここで、もし異常外乱により設定スラグ電圧が下がった場合や、極端な例として初期値を低く設定した場合を考えてみると、基本制御系の動作により電極先端はスラグ浴面に浸漬し、いわゆるディッピング状態となる。このようなことがもし起こる可能性があるならば、なんらかの防止回路が必要となる。

(2) 電源電圧変動

通常の生産ラインで ESR 設備が使用される場合、アーク炉などと同じ電源系統で電力が供給されることが多い。この場合には電源電圧はかなり変動するものと思われる。この変動が測定スラグ電圧の変動として検出される大きさである場合、電極先端とスラグ浴上面間で発生するアークによる測定スラグ電圧の変動と区別ができないので、設定スラグ電

第6図 電源電圧変動補償装置

圧は降圧される。

主電源に安定化電源を設けるのがこの問題を解決する最良の方法であろうが費用の点で問題がある。第6図に簡単な防止回路の例を示す。

7. 今後の課題

(1) オフセット

基本制御系にはオフセットが残る。積分動作によりオフセットをなくすことも考えられるが、リセットワインドアップ効果の抑止などに問題がある。むしろオフセット分を β から差引くようにした方が簡単である。しかしオフセットの大きさは条件によって異なる。少なくとも β から差引く値は試験溶解をまたねば決定できない。試験溶解の結果如何では β の符号（正負）を逆にしなくてはならないこともありうる。

(2) 大容量 ESR

テストプラントとして使用したのは1トンおよび2トン ESR であるが、紹介した ESR コントローラは15~20トンの ESR 設備までの実績はある。

ESR 装置

(3) 最適 ESR 溶解

最新式の ESR コントローラは充分その機能を発揮しているが、豊富なテストプラントに恵まれ理論より実際が先行したきらいがある。

理論的、定量的解明を基に、どのような溶解が行われたとき最小の生産費で最高品質の製品が生産されるかを究明し、そのような溶解を実現するためには現在の ESR コントローラをどのように改良すべ

ESR 製品

きかを研究開発して行かなければならない。

8. あとがき

試作 ESR コントローラおよび試験溶解中の ESR 設備, ESR コントローラによる試験溶解結果(製品)の写真を参考までに掲載しておく。最後に本 ESR コントローラ試作に多大の御協力をいただいた当社波川工場 特殊溶解課山口課長はじめ関係の皆様に感謝します。