

討19

油圧圧下系への設備診断技術の適用

(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所。浜口 理彦, 中島 繁紀, 岸本 吉功
電子技術センター 北村 章

1. 緒言

近年, 鋼板製品の品質に対するユーザー要求が厳格化する一方, 製品歩留向上のため各社, 高応答, 高精度な油圧圧下装置を圧延機に設置し, 油圧AGC (Automatic Gauge Control) を導入して効果を上げている。しかし, 油圧AGCの導入により従来の電動AGCの電動機制御の考え方では, 油圧圧下システムの性能維持・管理および安定操業が困難となってきた。

このような状況において最適な保全を実施するためには, 油圧圧下系の動特性に着目した設備診断技術の適用が必要と考え検討を行った。その結果, AGCシステムの安定性・機器の劣化を周波数応答特性とミル定数により診断する技術を実用化した。ここでは加古川製鉄所厚板工場の仕上圧延機を例として, (1)油圧圧下系の理論解析およびシミュレーション結果 (2)実用化した診断技術 (3)診断事例について述べる。

2. 理論解析

加古川製鉄所厚板工場に導入された油圧AGCシステムの概要を図1に示す。

当初, AGCによる板厚制御精度を向上させるため, サーボ系の応答性が圧下の応答性を支配していると考えて可能な限り高応答に設定していた。しかし, 圧延中に油圧配管, 制御系が振動し, 安定操業を続けることができなかった。

これは, ミルヒステリシスが大きいことためAGC系の動特性が変化することが原因と考えられた。そのため機械的対策によりミルヒステリシスの減少を進めると共に, 油圧AGCシステムの制御特性に関する問題点を解決し, 安定操業を実現すべく動特性を中心に理論解析を行った。

2.1 数学モデル

図2に示す油圧AGCシステムを数学モデルで記述した。数学モデルは圧延特性式, 油圧サーボ系の動特性式およびAGC制御ロジックから構成される。これらを以下に示す。

(1) 圧延特性式

$$\text{ゲージメータ式} : h = S + \frac{P}{M} \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{荷重式} : P = \frac{MQ}{M+Q} H - \frac{MQ}{M+Q} S \quad \text{----- (2)}$$

P : 圧延荷重, M : ミル定数, S : ロールギャップ

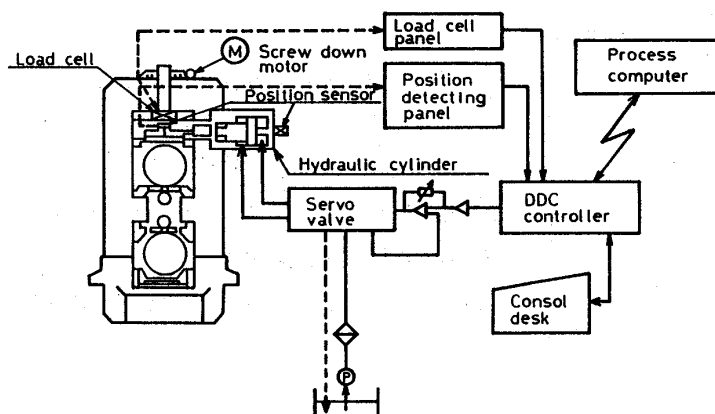


Fig. 1 Outline of Hydraulic AGC system

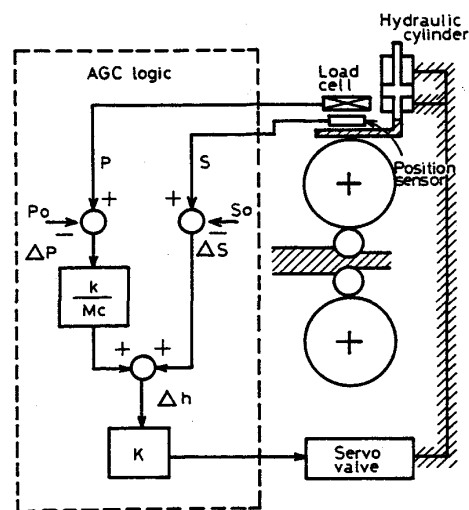


Fig. 2 Logic of Hydraulic AGC system

Q：塑性係数，h：出側板厚，H：入側板厚

(2) 油圧サーボ系の動特性式

サーボ弁の特性を2次特性で近似し，シリンダーの特性が積分特性であることを考慮すると，サーボ電流 Δe とシリンダ移動量 ΔS との関係は，次式となる。

$$\Delta S = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\eta\omega s + \omega^2} \cdot \frac{1}{s} \Delta e \quad (3)$$

ω ：共振周波数， η ：減衰係数

s：ラプラス演算子

(3) 制御ロジック

圧延中のスキッドマークによる入側板厚の変動によって出側板厚変動は，次式で表わされる。

$$\Delta h = (S - S_0) + k \frac{P - P_0}{Mc} \quad (4)$$

P_0 ：ロックオン荷重， S_0 ：ロックオンギャップ

k：チューニング率，Mc：ミル定数設定値

そして，制御量として， $K \cdot \Delta h$ （K：比例ゲイン）なる量が油圧サーボ系にフィードバックされる。これらを組み合わせブロック線図で表わしたものを図3に示す。

2.2 解析結果

上記モデルをもとに系の動特性を表わす伝達関数 $G(s)$ を導くと，次式となる。

$$G(s) = \frac{1}{M} - \frac{k' K \omega^2}{(M+Q)s^3 + 2\eta\omega(M+Q)s^2 + \omega^2(M+Q)s + K\{M+Q(-k')\}\omega^2} \quad (5)$$

ただし

$$k' = k \cdot M/Mc$$

本稿では詳細は省略するが，式(5)の伝達関数を状態方程式で記述し，現代制御理論を適用することにより安定条件およびAGCシステムの動特性を最適に制御する制御ゲインを得た。

(1) 安定条件

AGCシステムの動特性を安定に保つためには，K，kが次の条件を満足しなければならない。

$$K < 2\eta\omega \frac{M+Q}{M+Q(1-k')} \quad (6)$$

$$k < \frac{Mc}{M} + \frac{Mc}{Q} \quad (7)$$

(2) 最適制御ゲイン

$$\hat{K} = \frac{\omega}{4\eta} \cdot \frac{M+Q}{M+Q(1-k')} \quad (8)$$

$$\hat{\eta} = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (9)$$

式(9)は油圧サーボ系に対する条件であり，この条件に基づく最適な周波数特性は図4のようになる。これと比較して油圧配管あるいは制御系が振動を起こしていた時の周波数特性（図5）は，ゲイン特性が高すぎ

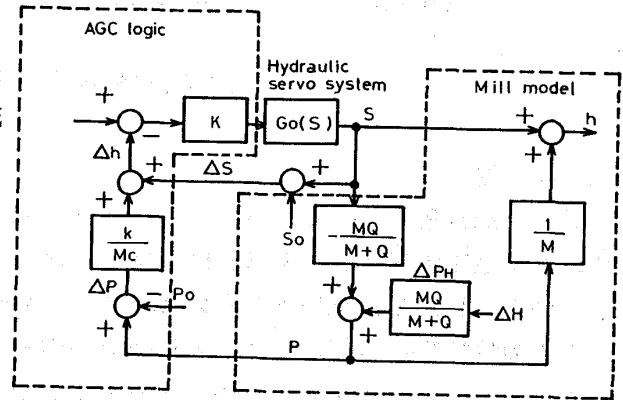


Fig. 3 Block diagram of Hydraulic AGC system

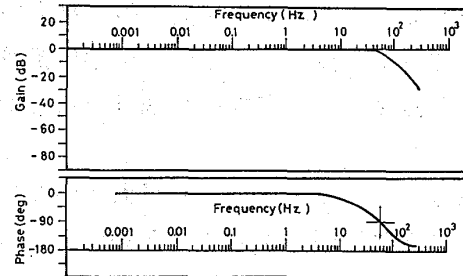


Fig. 4 Optimized frequency characteristics of servo system (Simulation)

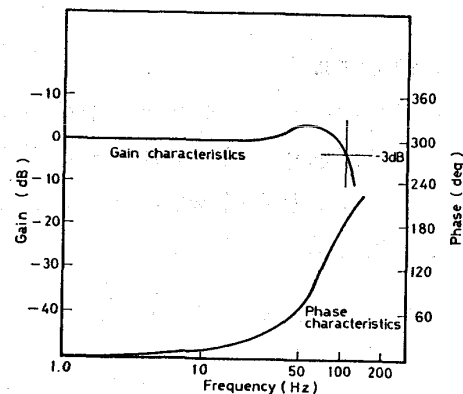


Fig. 5 Frequency characteristics of servo system (Actual measured data)

ることが確認された。サーボ系のゲインの適性化により振動の発生を防ぐことができた。

3. 診断技術

前項の油圧AGCの動特性の理論解析により油圧圧下系において、サーボ系の特性とミル定数が安定性および最適ゲインに大きく影響することが明らかとなった。ミル定数についてはミルヒステリシスと共に機械的対策を実施し、定期的に測定することで一定に管理することができた。

サーボ弁はその使用環境が非常に厳しいため油の汚れ、スプールの摩耗によるサーボ弁の中立点ずれあるいは応答性の変化があり、定期取替だけではサーボ系の特性を維持することは困難である。

また、サーボ系の応答性と圧下シリンダー位置制御系の応答性は線形ではなく、図6に示すような関係になることがシミュレーションおよび実機測定で確認された。

一方、制御系の特性を表わす方法としては種々あるが、その中でも周波数応答特性の測定は系のゲイン特性、位相特性さらに減衰率を容易に知ることができるので適当である。

従って、油圧圧下系の設備診断はサーボ系の周波数応答特性を測定し、そのゲイン特性の形状と応答性（ゲイン特性が -3 dB を切る周波数）により可能になる。そしてサーボ弁を含む機器の劣化と油圧圧下系の状態を診断することができる。

周波数応答特性の測定を図7のブロック図に示す。

また診断方法は図8に診断フロー図で示す。

4. 診断事例

前項で述べた診断技術によって見つかった油圧圧下系の不具合事例を図9～12に示す。

図9はサーボ弁の劣化によってサーボ系の応答性が著しく低下している事例で、サーボ弁の取替によって応答性が改善されている（図10）。

図11はサーボ系のゲイン特性が高周波域で高ゲインとなっており、油圧配管、制御系が振動し易くなった事例である。調整によって図12のように適性化した。

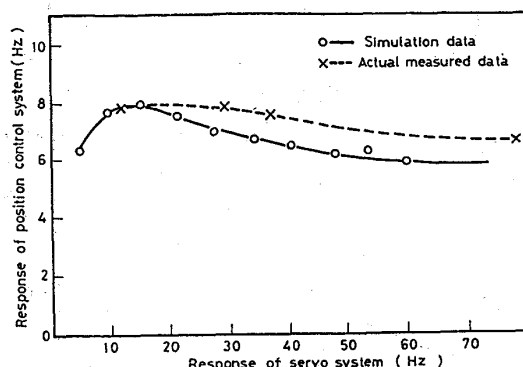


Fig. 6 Relation of response between servo system and position control system

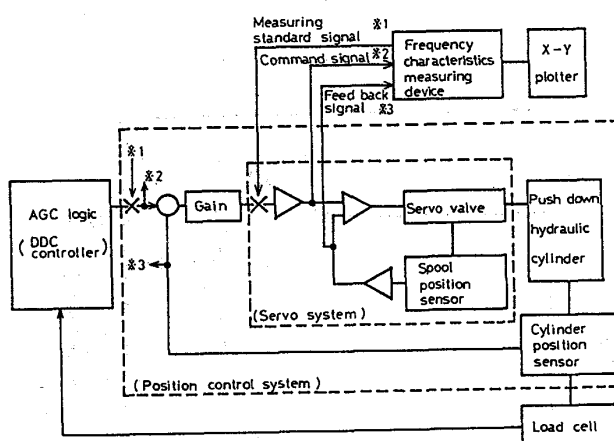


Fig. 7 Method of frequency characteristics measuring

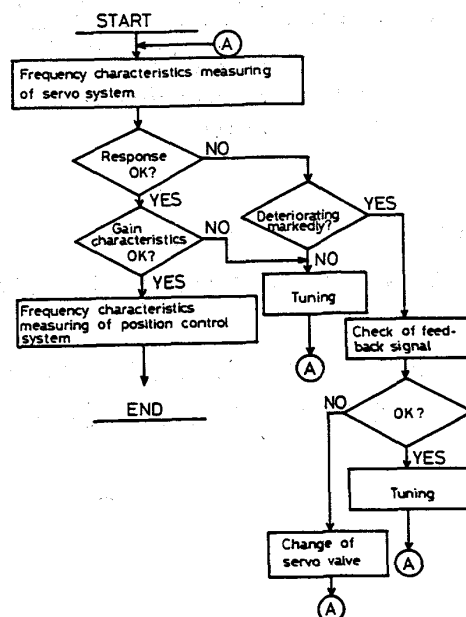


Fig. 8 Machine diagnosis method of Hydraulic roll gap control system

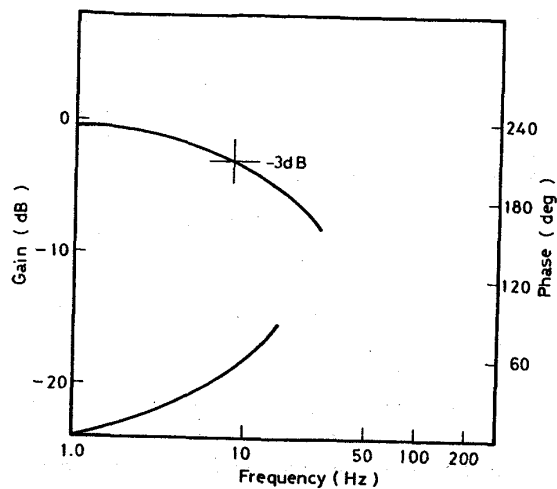


Fig.9 An example of frequency response of servo system with wrong servo valve

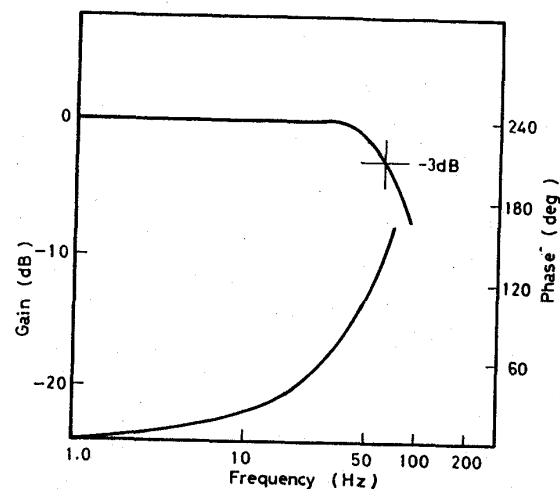


Fig.10 An example of frequency response of servo system after changing servo valve of Fig.9

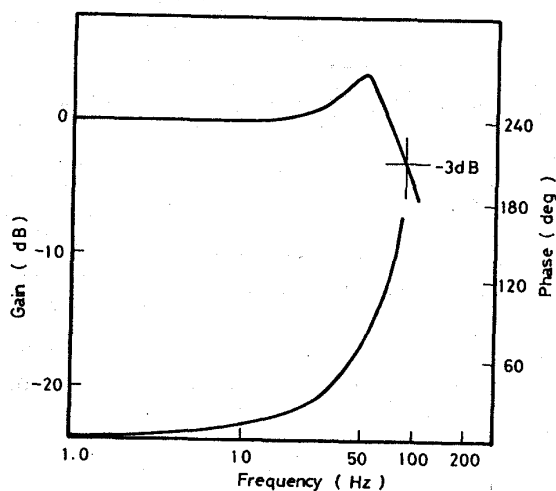


Fig.11 An example of frequency response of unstable servo system.

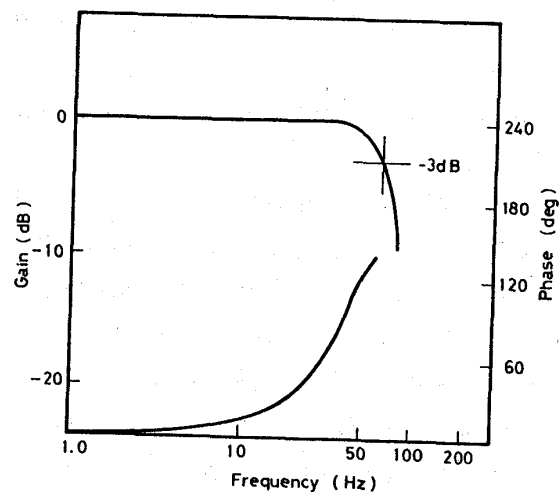


Fig.12 An example of frequency response after tuning servo system of Fig.11

5. 緒 言

油圧A G Cを導入している圧延機の油圧圧下系の設備診断について厚板工場の仕上圧延機を例にして述べた。この設備診断技術の適用によって厚板工場ではチューニング率の向上が可能となり、多大な効果を得ることができた。

加古川製鉄所では熱延工場と冷延工場にも油圧圧下装置が導入されており、本設備診断技術を適用することにより性能維持、安定操業を可能とし効果を上げている。