

インバータによるボイラ誘引通風機の省電力運転

Saving Energy Operation on Boiler Induced Draft Fan by AVAF Inverter

可変周波インバータによる風水力機械の省電力運転は、各産業界に積極的に採用されてきているが、ボイラ用通風機の可変速制御は大きな省電力効果を期待できるにもかかわらず、燃焼系と直接的な関連をもち、かつボイラ制御系が多変数制御系であることなどからプロセス制御上の検討が不可欠となるため、通風機への積極的な適用が遅れていた¹⁾。

このたび、製鉄所の高炉ガスを主燃料とした215t/h混焼ボイラの平衡通風方式誘引通風機に可変周波インバータを導入して回転数制御を行ない、所定の省電力効果を達成するとともにボイラの制御性も極めて安定していることが1年以上にわたる運転実績で確認できたので、その検討対策事項や制御方式、効果などについて紹介する。

湯原 大* Takeshi Yuhara
尾崎 一貴* Kazutaka Ozaki
川口 敏雄** Toshio Kawaguchi
佐村 隆幸*** Takayuki Samura
小松喜一郎**** Kiichirô Komatsu

1 緒言

ボイラシステムへの省電力のための回転数制御導入には、省電力効果はもとより運転の安定化と高信頼度が要求される。特に、製鉄所の自家発電兼用ボイラは高炉ガスなどの副生ガスを主燃料としているため、一般のボイラに比べて下記の問題があり回転数制御の実現は非常に困難とされていた。

- (1) 発熱量が700kcal/Nm³程度と低く、かつ変動が大きい。
- (2) 燃料ガス供給元圧が数百水柱ミリメートルと低いため、炉内圧変動により燃料流量が大きく変動する。
- (3) 安定燃焼範囲が狭く、失火しやすい。
- (4) 負荷変動範囲が広い。

このたび日新製鋼株式会社呉製鉄所では215t/h自然循環ボイラのIDF(誘引通風機)に日立製作所の電流形AVAF(Adjustable Voltage Adjustable Frequency: 可変電圧可変周波)インバータを導入して省電力化を図るとともに、上記の諸問題

に対応した制御技術を確認し、燃焼制御系の応答性の改善及びAVAF故障時のシステム対応にも良好な結果を得て、懸案の製鉄所高炉ガス混焼ボイラ誘引通風機の高信頼度回転数制御システムを実現した。

2 ボイラ系の構成とIDFの省電力運転

2.1 ボイラの構成

本ボイラはBFG(高炉ガス)を主燃料としているが、BFGは低カロリー燃料であるため重油を常時助燃している。また、重油専焼及びガス重油混焼も可能なシステムで、ボイラとタービンとは一機一缶構成となっている。ボイラ全景を図1に、ボイラのシステム概念図を図2に示す。

ボイラの通風系は燃料量に見合った空気を送り込むFDF(押込通風機)と炉内圧を大気圧よりもやや負圧に保つためのIDFにより構成される平衡通風方式となっている。給水ポンプは1台の予備を含み2台でボイラの定圧運転を行なっている。

ボイラの主要補機の中で、負荷の変化量が大きく、省電力効果が最大のIDFを回転数制御による省電力運転の対象として選定し導入検討を図った。

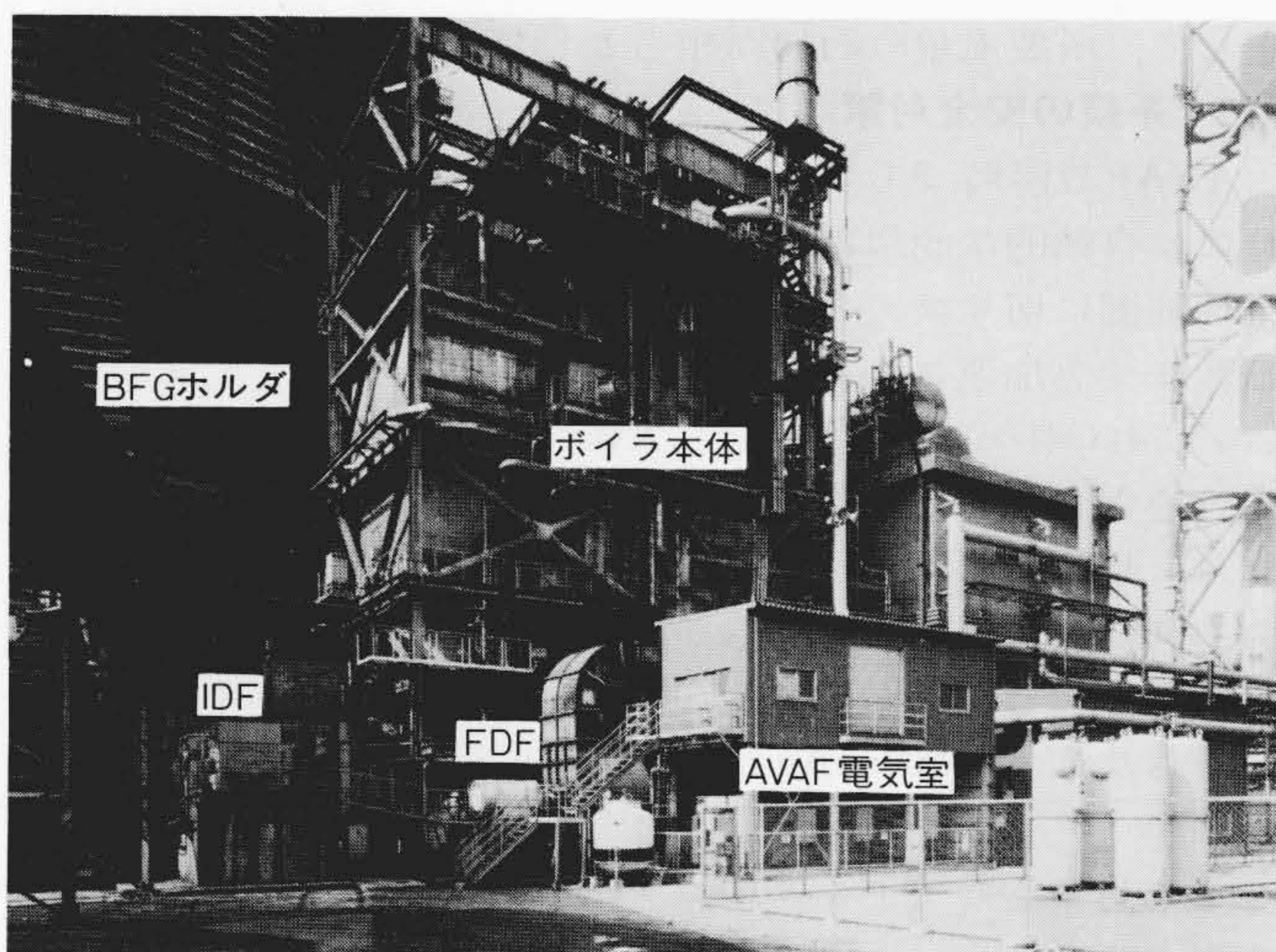
2.2 AVAFインバータ導入上の検討

(1) AVAFインバータの採用

IDFの回転数制御方式として、流体変速機による制御方式と可変周波インバータによる電動機の回転数制御方式の二案について検討を行なったが、前者は、設備費は安いが低速運転時の効率が悪く、必ずしも優位と言えないこと、通風機周りの土木基礎工事追加が必要なため、所定のボイラ定期修理期間中に完了できる見通しの得られなかったこと、更に継手の故障が発生した場合のバックアップ運転ができないことなどから、可変周波インバータを採用することにした。

(2) 省電力効果²⁾

ダンパ制御方式をAVAFインバータによる回転数制御方式とした場合の省電力効果を、表1に示す。更に、実際の動作点に見合うようにIDFのインペラカットも併せて行ない所要動力の低減を図った。ボイラの稼動条件を加味して消費電力を算定すると、導入前の検討では約56%もの省電力効果が期



注：略語説明 BFG(高炉ガス)、IDF(誘引通風機)、FDF(押込通風機)

AVAF(Adjustable Voltage Adjustable Frequency: 可変電圧可変周波)

図1 高炉ガス混焼215t/h自然循環ボイラ ボイラ正面にAVAF電気室を新設し、2階にAVAF及び高圧盤を、1階に入出力変圧器及び直流リアクトルを設置している。

* 日新製鋼株式会社呉製鉄所 ** 日立製作所日立工場 *** 日立エンジニアリング株式会社 **** バブコック日立株式会社呉工場

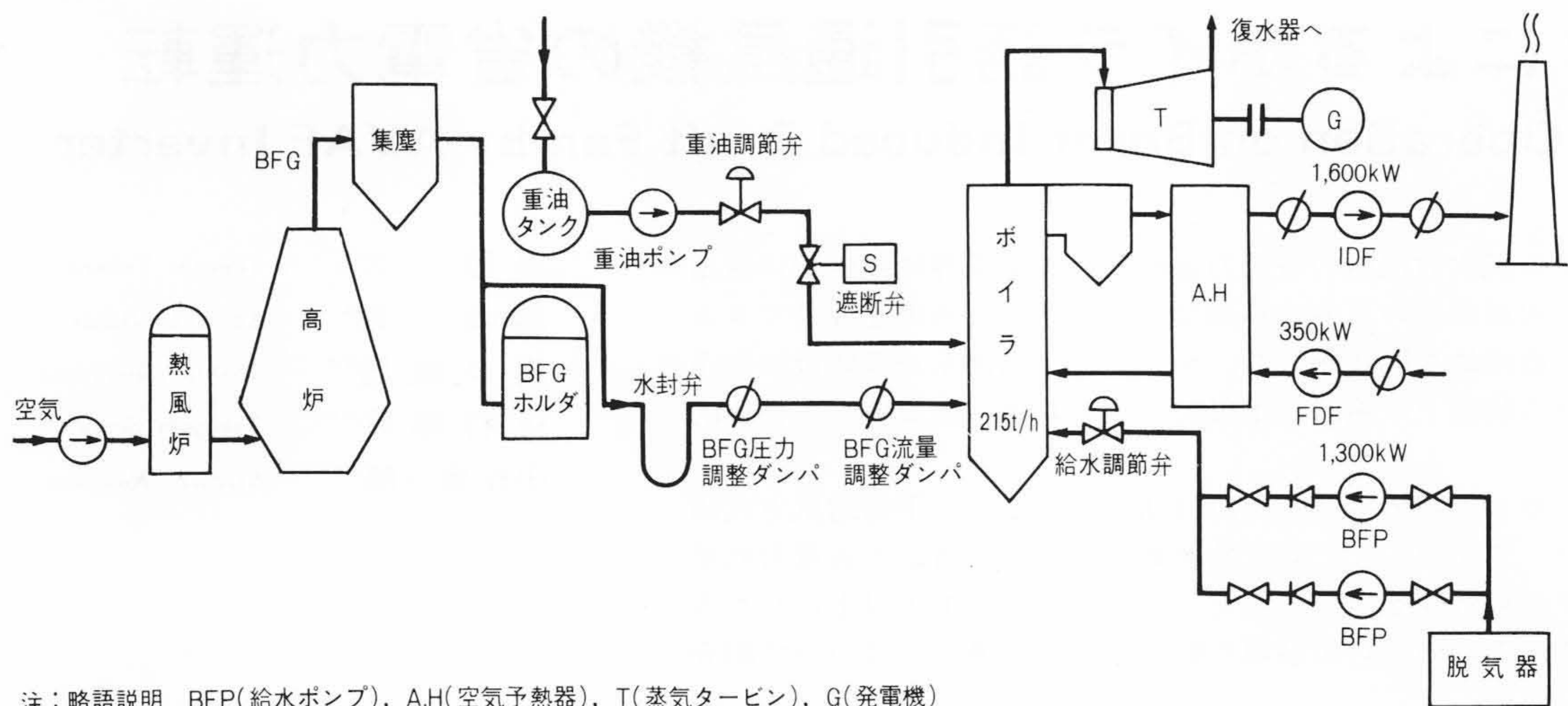


図2 ボイラのシステム構成概念図 最大容量補機であるIDFに回転数制御を導入した。

注：略語説明 BFP(給水ポンプ), A.H(空気予熱器), T(蒸気タービン), G(発電機)

表1 IDFの省電力効果 消費電力を相対比率にて示した。AVAF導入による省電力効果は56%の低減が予想された。

ボイラ負荷率		100	70	50
消費電力	現状ダンパ制御時	100	91	84
	AVAF制御時	98	42	19
省電力効果	消費電力	98	46	23
	平均運転比率	5	70	25
	総合消費電力比	44		

注：単位(%)

待され、実績もほぼ期待通りの効果を挙げている。

(3) 回転数制御導入上の問題

AVAFインバータによるIDFの回転数制御を導入するに当たっては、インバータ制御に起因する機械系共振や電動機及び通風機自体の諸検討はもとより、ボイラシステム上の諸問題の検討が必要であった。

大きな問題としては、従来のダンパ制御方式に比べて、大きなGD²(はずみ車効果)をもつ軸系を直接回転数制御することによる応答速度の低下、及びAVAFを付加することによる信頼性の低下である。

ボイラの負荷急変量は最大10%/min程度であり、これには回転数制御でも十分に追従可能であるが、燃料系の不安定性やAVAFトラブル時の切換対応などの過渡的な炉内圧変動の抑制には回転数制御だけでは困難であるため、ダンパの常時併用制御を採用することにした。一方、システム上の信頼性の維持については、AVAF自体の一部もしくは全体を並列冗長構成とする方法も考えられたが、経済性などで問題があるため、AVAFの故障に対しては既設商用電源に切り換えて、ボイラ通風系や燃焼制御系で対処検討することにした。

3 燃焼制御系の構成と対応

ボイラの制御対象は、主蒸気圧、温度、ドラム水位、火炉圧などがあり、また、これらを調節するための操作量も給水量、燃料量、空気量など数多く、しかもこれらが有機的に結合しているため、AVAFの制御方式や故障時の既設制御系との協調について検討した。

3.1 炉内圧制御

主燃料であるBFGは供給圧が低いので、炉内圧の変動によりその流量が大幅に変動するため、安定な燃焼を維持するには炉内圧の安定化を図ることが重要である。

炉内圧制御系は、一般にハンチングしやすい系であるため、炉内圧だけによる単要素制御によらないで、ガス量及びボイラマスタ指令値(燃料及び空気量)を先行値として排ガス量の制御を行なう必要がある。AVAFの速度制御は、燃料信号及びボイラマスタ信号による先行値制御を行なうとともに、炉内圧変動のフィードバック信号によってIDFダンパを制御する回転数ダンパ併用制御方式を採用し、炉内圧の安定化を図るようにした。

本制御方式とすることにより、IDFによる排ガス量はボイラの負荷状態及びガス混焼比でほぼ定まるので、回転数制御系の応答性を極端に早める必要がなく、安定した回転速度での運転を保持できる。またダンパの制御性についても、排ガス量が先行的にIDFの回転数で制御されているために、制御幅を常に最適値に保つことができる。このため、省電力の効果を損わずに炉内圧の脈動や過渡変動抑制に対し効果的な制御ができる。なおダンパでの風量の制御量は、ボイラの負荷急変による炉内圧過渡変動、BFGの供給圧やカロリー変動、AVAFの瞬時停電時の自動再始動に対する制御余裕などを考慮して、所要風量の約10%相当とした(図3)。

3.2 システムの安全対策

AVAF故障時でもボイラトリップを極力避けるため、故障時には自動的に商用電源に切り換え、併せてダンパ制御系も単独制御に切り換える方式とした。この場合、IDFが100%回転数まで急加速されることになり、炉内圧を大きく変動させる。これに伴ってBFG流量も大幅に変動するため、燃焼の安定性を保てなくなるおそれがある。安定した運転を継続するには、切換時の炉内圧変動を、BFGバーナの失火条件などから-50mmAq以内とすることが必要であった。

既設ダンパ制御系では、70%負荷状態で商用電源へ事故切換を行なうと-100mmAqとなり、安定な燃焼を維持できなくなる。

この対策としてダンパのコントロールドライブを高速形に変更するとともに、図3に示す制御系にダンパの強制絞り込み関数器f(x)を設け、IDFの回転数急変による炉内圧変動を抑制する切換システムとした。本切換方式に基づくAVAF故障切換時の炉内圧変動シミュレーション結果を、図4に示す。

これを精度良く解析するには電子計算機によるしかないが、近似的には図5の伝達関数を簡略化して計算することにより、炉内圧の基本的な動向を把握できる。一般にG₁(s)は微分要素、G₃(s)は積分要素であり、G₂(s)はダンパ特性が非直線的なため複雑となるが、ダンパ制御装置側でこれを補償して線形化

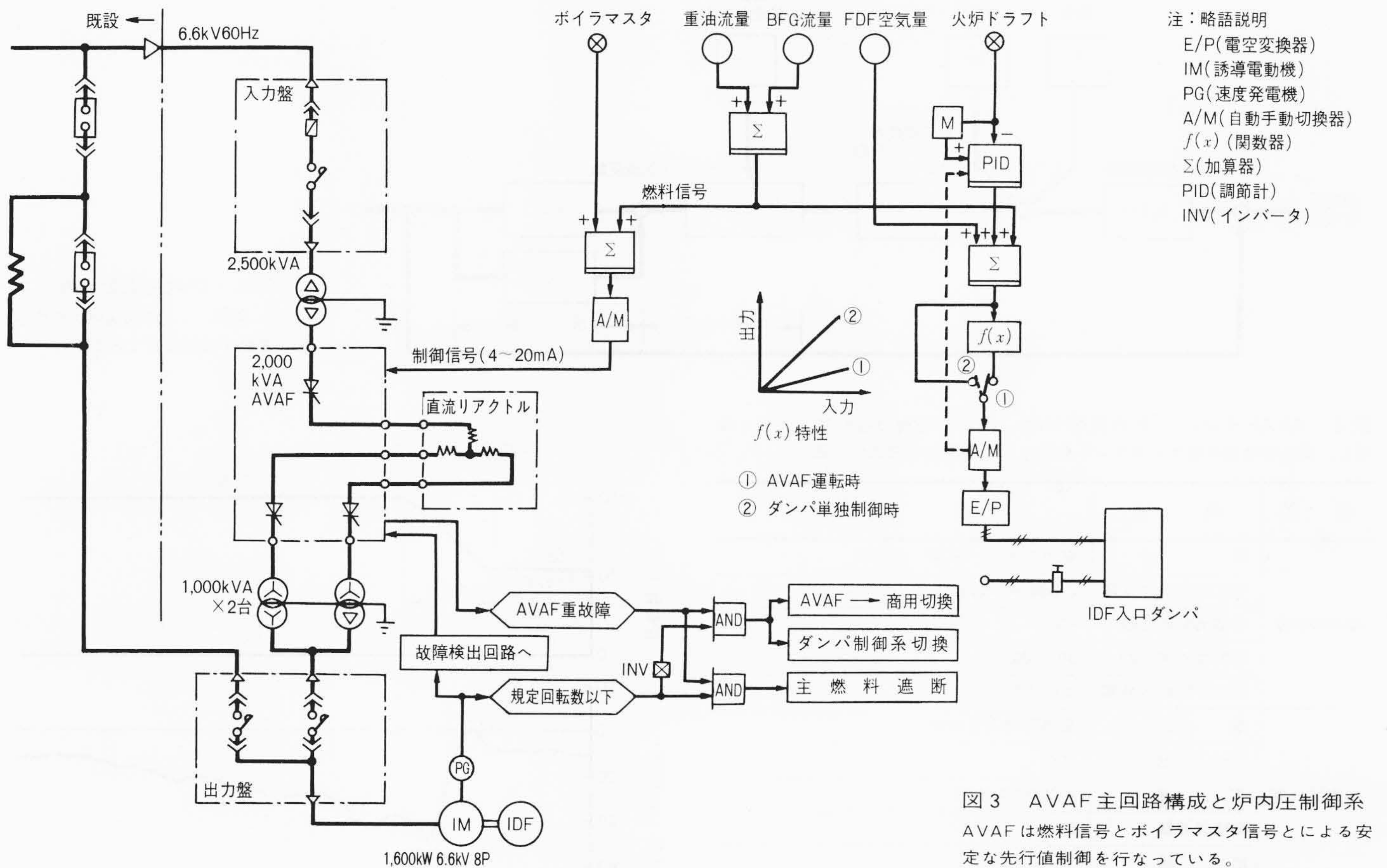


図3 AVAF主回路構成と炉内圧制御系
 AVAFは燃料信号とボイラマスタ信号とによる安定な先行値制御を行なっている。

することも行なわれている。この場合には $G_2(s)$ は一次おくれ比例制御特性となる。なお、 $B(s)$ は炉内圧変動による燃料、空気及びIDF風量の変動を総合的に表わす伝達関数である。

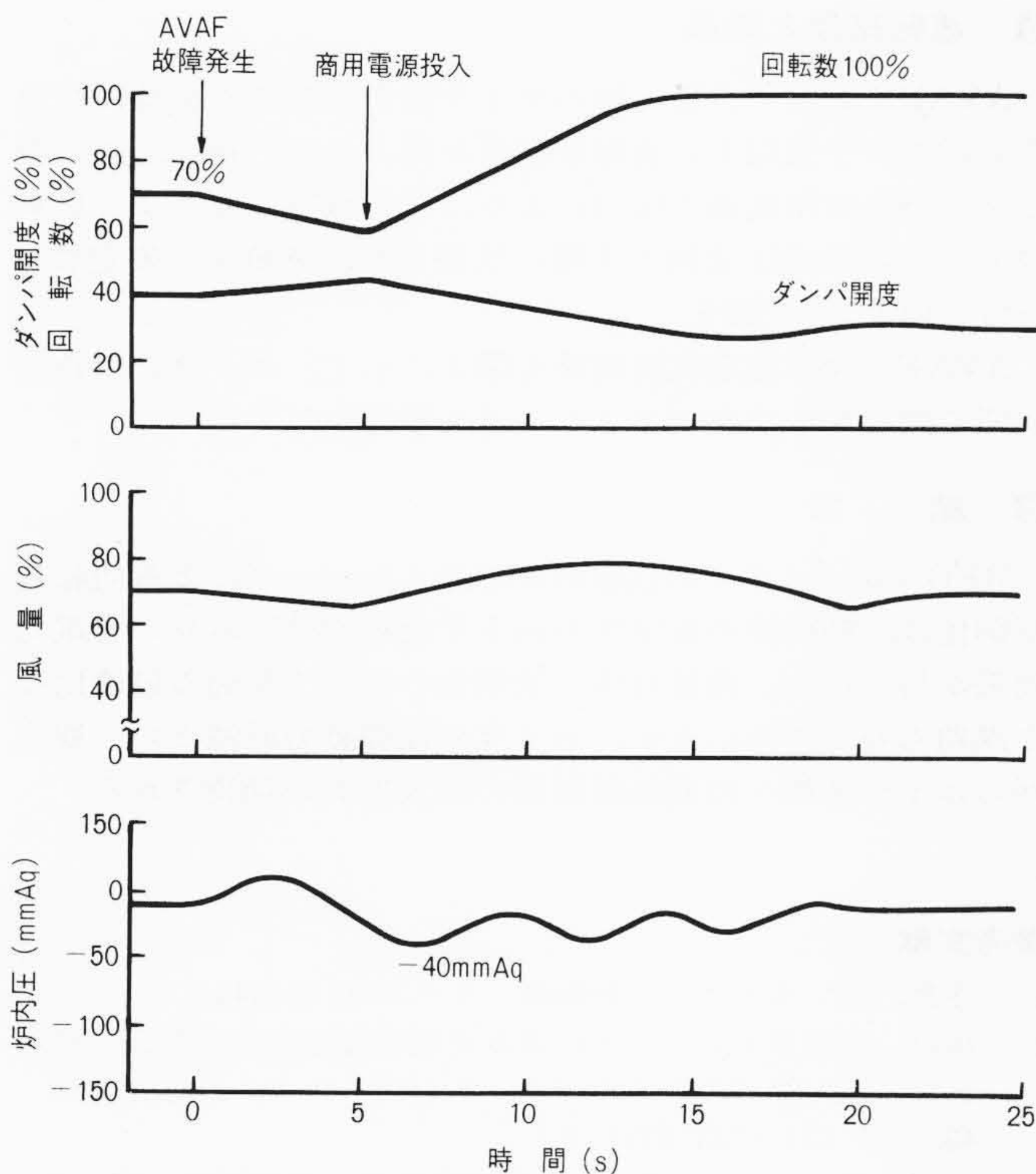


図4 AVAF故障切換時の炉内圧変動シミュレーション
 制御系やダンパコントロールドライブの変更により、70%負荷率時、炉内圧変動は最大-40mmAqに抑制されている。

このときの炉内圧変動幅は、切換前のIDFの回転数に左右されるため、AVAF故障時でのIDFの回転数を判別して商用電源への切換条件とするとともに、主燃料遮断を行なうようなインタロック構成とした。また、この切換時のBFG流量変動を極力抑えるため、ボイラ負荷に応じたバーナ本数で運転することが望ましいが、これは運用面で対処することにした。

4 AVAFと駆動系^{3),4)}

4.1 AVAFの構成

AVAFインバータの定格仕様を表2に示す。1,600kW電動機の全負荷運転ができるように、12相式電流形インバータ2,000kVAとした。

AVAFインバータの故障時のバックアップ運転を行なう商用電源回路にも接触器を追設し、AVAFでの常用運転中には始動リアクトルに荷電されないようにした。

4.2 駆動系の検討

AVAFインバータの導入に当たっては、ファンや電動機の振動、共振、過渡トルクなどの評価を行ない、回転数制御範囲を決めるとともに、ボイラ着火立上げもAVAFで行なえるようにした。また、AVAFの故障を速やかに検出することが必要であるため、速度発電機信号と速度指令を比較判別する方法を採用した。

電源系統や既設機器への高調波による影響についても詳細な解析評価を行ない、問題のないことを確認した。

4.3 瞬時停電と電源切換

入力電源の瞬時停電が発生しても1秒以内の停電についてはIDFの運転継続のため、瞬時停電自動再始動方式を採用した。また、定常運転中にAVAFと商用電源とを相互に任意に切り換えられるシステムとし、故障復旧やボイラ負荷率の高い状態への対応を容易にした。

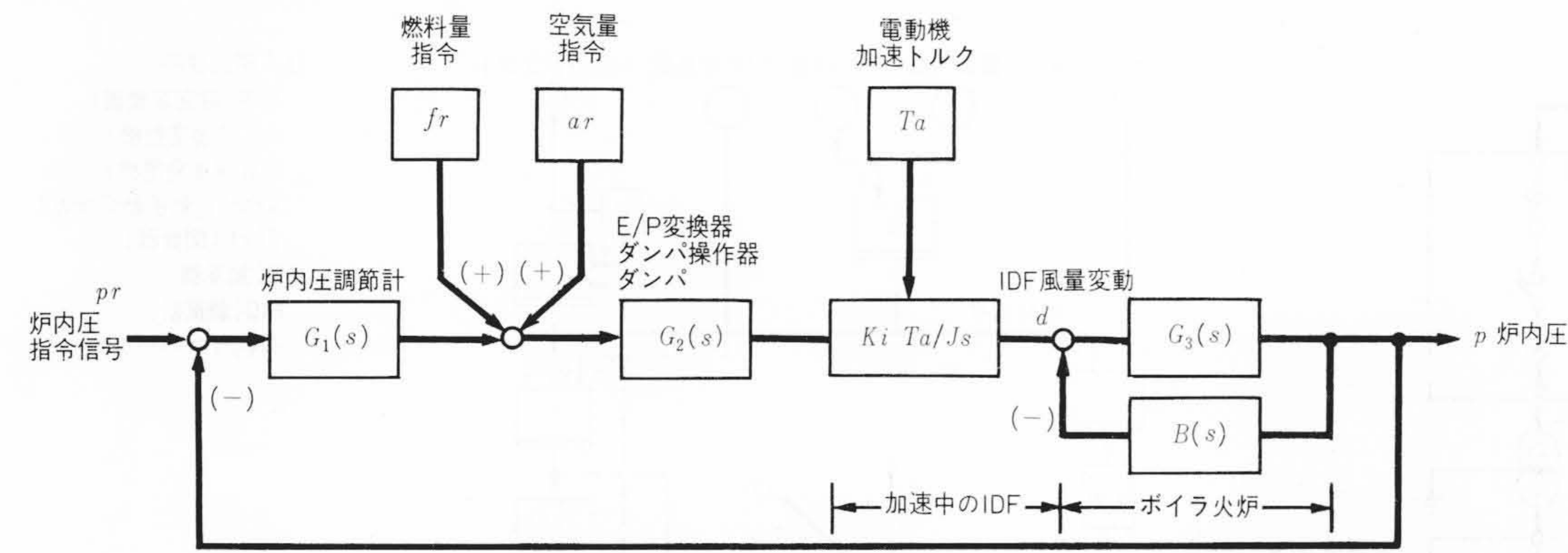


図5 炉内圧変動解析ブロック図 IDF加速中の炉内圧変動を伝達関数で表わす。

表2 AVAFインバータの定格仕様 AVAF本体は強制風冷方式を採用し、変圧器は屋外形エレファント構造として配置上の最適化を図った。

機 器	項 目	仕 様
AVAF本体	方 式	電流形インバータ 12相式
	可変周波出力容量	2,000kVA 連続
	定格出力周波数	60Hz
	回転数制御範囲	30～100%
	瞬時停電許容時間	1 s 以内
出力変圧器	構 造	屋外形油入自冷式
	台 数	2 台
	容 量	1,000kVA 連続
	定格周波数	60Hz
	結 線	△/△, △/△
入力変圧器	構 造	屋外形油入自冷式
	台 数	1 台
	容 量	2,500kVA 連続
	定格周波数	60Hz

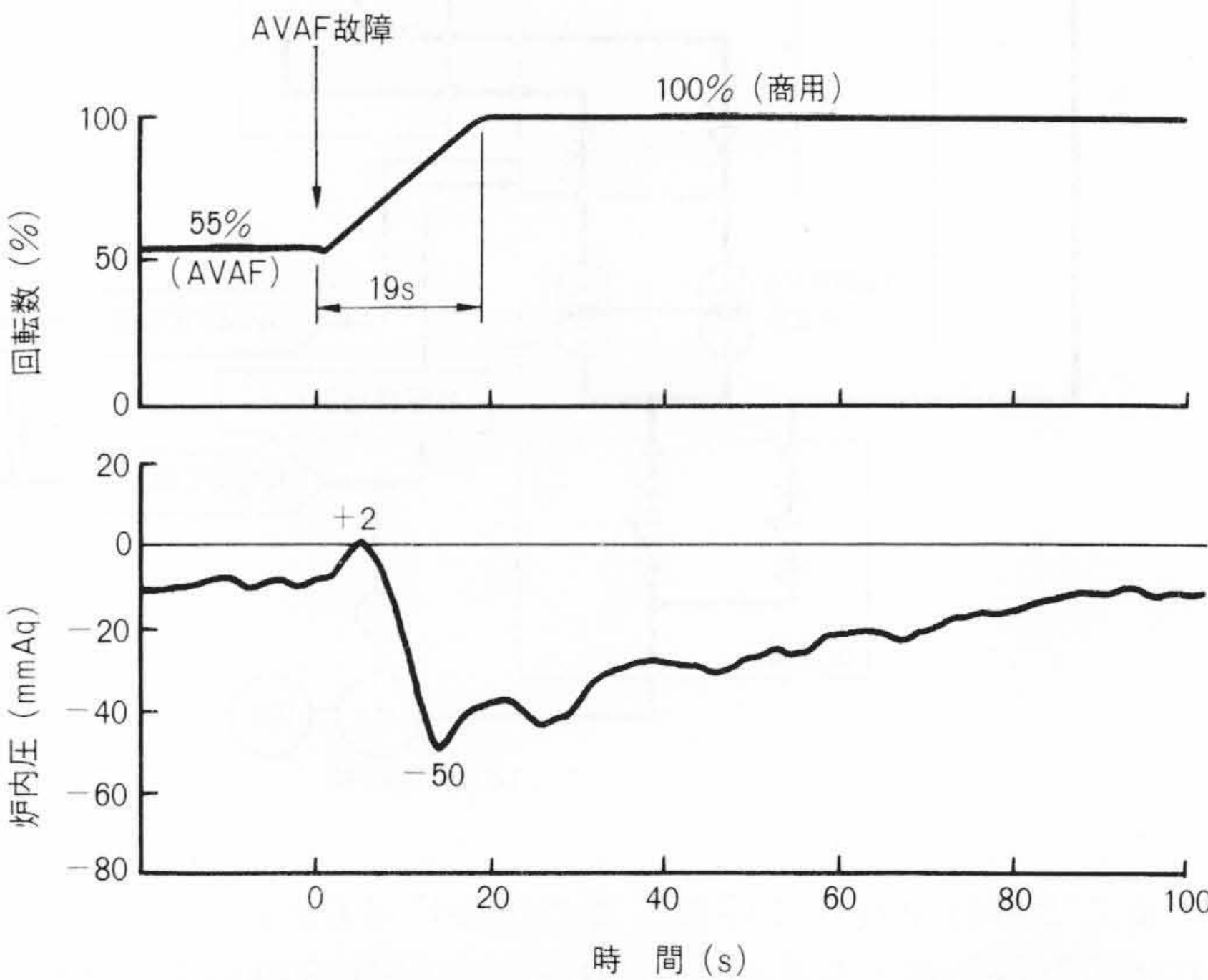
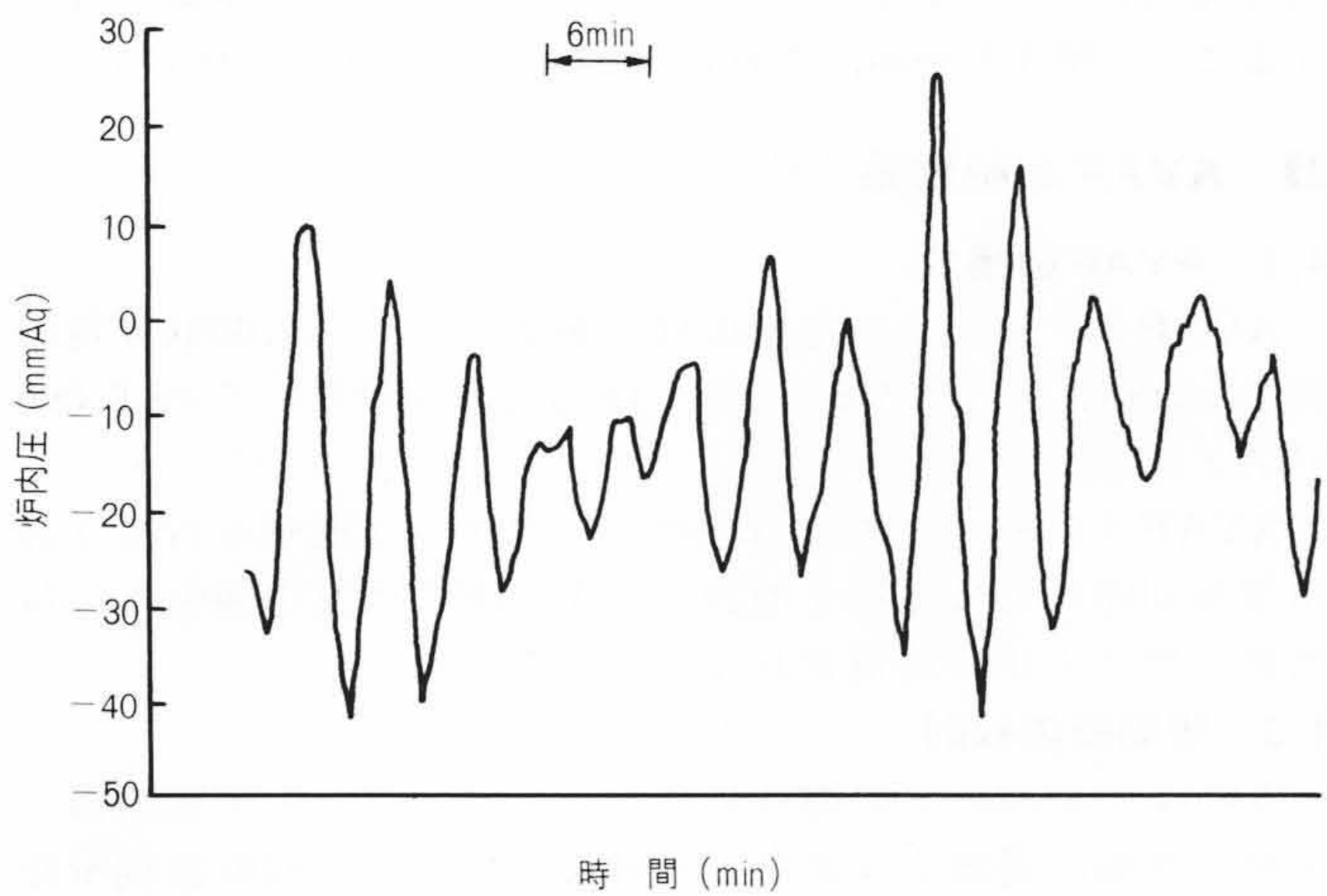
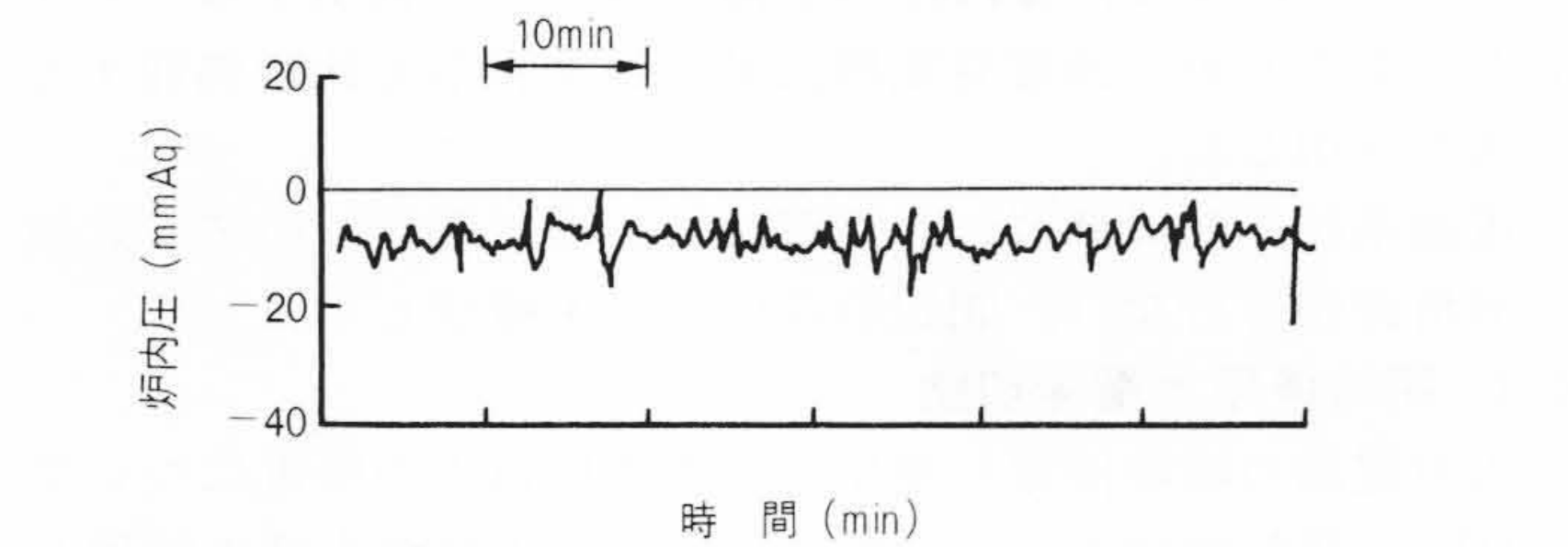


図7 AVAF故障想定試験結果 IDFの回転数が55%の状態では商用電源へ故障想定切換を行ない、正常に運転継続することを確認した。



(a) 回転数制御の導入前



(b) 導入後

図6 ボイラ炉内圧変動の測定結果 回転数制御の導入により、炉内圧は大幅に安定した。

5 運転結果と効果

AVAFインバータ導入後のボイラ総合運転での静特性や負荷追従で、予想以上の良好な結果が得られた。特に、回転数とダンパの併用制御の採用により、定常状態はもとより負荷急変時での炉内圧変動が大幅に改善され、燃焼系の安定性は一段と向上した(図6)。

AVAFの故障想定試験結果を図7に示す。ボイラ常用負荷範囲で問題なく切換のできることを確認した。

6 結 言

BFG混焼ボイラでのIDFのAVAFインバータによる回転数制御化は、制御性や安定性の向上を含め期待どおりの省電力効果が得られた。機器自体の信頼性の改善や制御の最適化など課題も残ってはいるが、ボイラの補機動力低減という観点からボイラ補機への回転数制御の導入拡大が期待される。

参考文献

- 1) 寺野、外：ボイラの自動制御、オーム社(昭和44年)
- 2) 川口、電流形インバータによる交流可変速駆動の実例、電気計算・電力節減のためのパワーエレクトロニクス応用技術、48、8、134～143(昭55-5)
- 3) 松平、外：インバータによる電動機制御、日立評論、60、6、415～420(昭53-6)
- 4) 岩田、外：交流電動機の可変周波インバータ制御、日立評論、61、10、693～698(昭54-10)