

ペルトン水車の安定性と即応性の改善

Improvement of Stability and Response Speed of Pelton Turbine Governor

In case there is a sudden drop in load allowing deflector to cut into the jet, the control system becomes duplex as the speed control function of the needle is aided by the deflector. If, under such condition, the needle can be arranged to close at a predetermined rate regardless of speed governing signal, system stability will be improved remarkably. Further, in the deflector control system, if damping circuit is given a saturation characteristic which is valid for closing motion alone, the speed governor can gain sufficient stability without sacrificing desired response speed. The article introduces studies and field data which support the above.

横井川辰男* Tatsuo Yokoikawa

平井嘉雄* Yoshio Hirai

桑原尚夫** Takao Kuwabara

小熊知周** Tomochika Oguma

1 緒言

自動制御系において安定性と即応性は一般に相反する関係にあり、両者を完全に両立させることのむずかしさは毎々指摘されることである。ペルトン水車においては負荷急減時の速度上昇を止めるために即応性の高いデフレクタ制御系がある一方、水圧変動値によって開閉時間が制限されゆっくり応答するニードル制御系がある。このようにしてペルトン水車は負荷の増加率についてはニードルの開時間で、減少率についてはデフレクタの閉時間で制限され、この間の負荷変動率、特に急減時に十分な安定性を保持できるかどうかは単独送電の成否を決めるかぎになる。

負荷が急減してデフレクタがジェットに切り込んだ場合、デフレクタ制御系自身の安定性が問題になることはもちろん、水車出力がニードル開度とデフレクタ開度の2変数関数になるためにニードル制御系との相互干渉も問題になる。さらに、両制御系には上述したような安定性と即応性との両立のむずかしさが内在している。従来よりペルトン水車が他の水車に比べ制御がむずかしいとされている理由はこの辺にある。

今回、関西電力株式会社草野川発電所（以下、草野川発電所と略す）で単独送電への移行を可能にするための対策を実施することになり、改めてこの問題に取り組む機会を得たのでその成果を含めてここに報告したい。

2 草野川発電所の単独送電

(1) 対策の必要性

草野川発電所のペルトン水車発電設備は昭和13年に納入されたものであるが、昭和43年にガバナの速度検出部のみ電気式に変更されている。機器の概要は表1に示すとおりである。図1はガバナの内部機構を示す略図である。この発電所は常時は関西電力株式会社の新長浜（22kV系）系統に接続されているが系統側に事故が発生した場合、新長浜系統との接続用しゃ断器が開くので周辺民家への直接配電負荷を単独で負担することになる。この直接配電負荷は納入当初は100kW程度でさほど大きくなかったが、今日では本発電所の定格出力の半分に近い約1,000kWに増大している。

納入当初の記録によると単独送電への移行はもちろん、負

荷しゃ断後の安定性でもかなり苦労している。この結果、図2のようにデフレクタの下限を制限して、しゃ断後デフレクタがジェットを完全に切らないように対策している。これは一度速度上昇を止めさえすれば、その後は速度がゆっくり下降するようにして、この間にニードルを所望の開度まで閉めることを意図したものである。

しかしこの方法は、単独送電移行時のように変化後の負荷が定まらない場合には採用することはむずかしい。

なお、ダンピングを大きくすると速度上昇値が高くなるので制限がある。

このような事情から、単独送電への自動移行はむずかしいので実施せず、一度直接配電負荷もしゃ断して再並列することになっていた。しかし、発電所の遠距離制御化計画との関係から無停電単独送電移行の必要性が生じ、今回対策を実施することになった。

(2) コンピュータによるシミュレーション

対策に先だて現状認識のためにコンピュータシミュレー

表1 草野川発電所発電プラントの概要 水車、発電機、水圧鉄管および調速機の仕様を示す。

Table 1 Specifications of Kusanogawa Plant

項	目	仕	様	
水	形	式	横軸二射ペルトン水車	
	最	大	出	
	力			
	2,600kW			
水	最	高	有	
	効	効	落	
	差			
	202.1m			
水	回	転	数	
	400rpm			
	発	形	式	横軸三相回転界磁
		定	格	容
量				
3,000kVA				
発	周	波	数	
	60Hz			
	GD ²		13t·m ² (水車分を含む)	
水	時	定	数	
0.59s				
調	形	式	日立EEB形	
	油	圧	12.8~13.8kg/cm ²	
	ニ	ード	ル	
	時	間		
(開) 80s, (閉) 20s				
デ	フレ	クタ	時	
間				
(開) 0.5s, (閉) 0.5s				

* 関西電力株式会社滋賀支店 ** 日立製作所日立工場

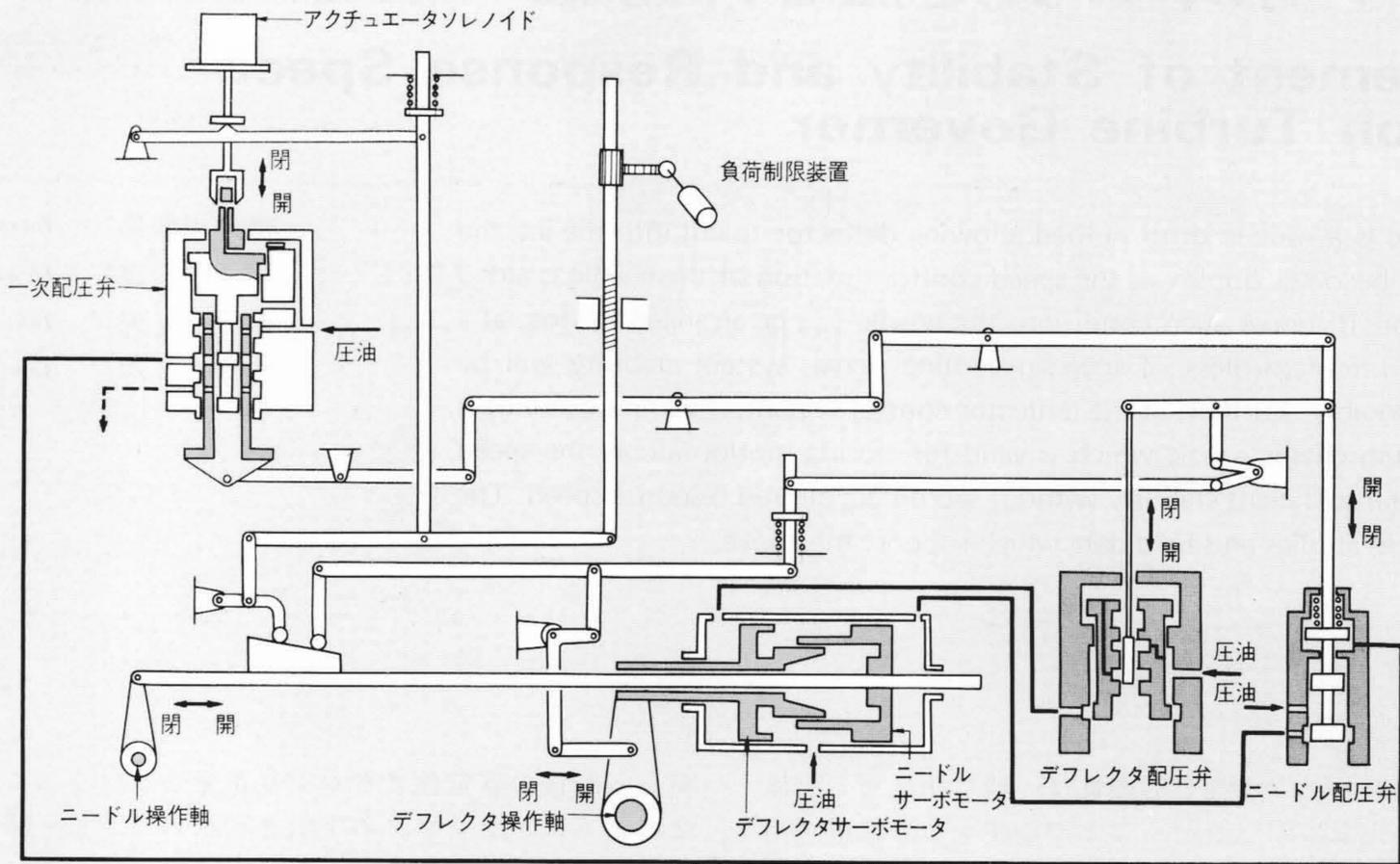


図1 草野川発電所ガバナの内部機構 主としてニードルおよびデフレクタの油圧増幅部の機構を示す。

Fig. 1 Schematic Diagram of Kusanogawa Governor

ションを行なった。図3はこのためのブロック線図を示すものである。ただし、

- P_c : 速度調定率 (%)
- A_n : ダンピングゲイン (%)
- T_n : ダンピング時定数 (s)
- y_n : ニードルサーボモータ開度 (mm)
- y_d : デフレクタサーボモータ開度 (mm)
- S_d : ジェット中心よりデフレクタ先端までの距離 (mm)
- n : 水車回転数 (%)
- P : 水車の正味出力 (MW)
- ΔL : 負荷変化 (MW)
- C_p : 有効ジェット系数 (unit)

- C_0 : 部分負荷系数 (unit)
- r_j : ジェットの半径 (mm)
- T_w : 水圧鉄管の時定数 $\sum L_i V_i / g H_0 = 0.59s$
- L_i : 水圧鉄管の各部の長さ (m)
- V_i : 水圧鉄管各部の流速 (m/s)
- H_0 : 基準落差 = 202 (m)

このシミュレーションでは、図4のようにデフレクタがジェットに切り込んだとき、バケットにあたる有効ジェットは斜線の部分だけであるので、有効ジェット系数を C_p として

$$C_p = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{a}{r_j} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r_j}\right)^2} - \sin^{-1} \frac{a}{r_j} \right) / \pi \dots\dots(1)$$

を考慮した。また、水圧鉄管は剛性理論で近似した。

図5は計算結果の一例を示すものである。ただし、

a の値は $S_d > r_j$ のとき r_j , $S_d < -r_j$ のとき $-r_j$, $-r_j < S_d < r_j$ のとき S_d とする。

また、 CT_N : ニードル閉時間, OT_N : ニードル開時間, CT_D : デフレクタ閉時間, OT_D : デフレクタ開時間を示すものである。

傾向としては良く似ていたが実際には点線のようにハンチングが持続した。これはデフレクタ制御系がかなり不安定なためであるが、デフレクタの動作がきわめて速いことを考慮すれば、わずかの不動時間、過渡的なジェットの乱れなどによって簡単にこのような持続振動に発展するものと考えられる。

さらに、系統との連係運転から単独送電へ移行する場合、負荷の変化幅が大きければ大きいほど激しいハンチングを伴う可能性があり、他方、デフレクタにはストロークの制限があるために変化後の単独負荷の大小によってデフレクタ全閉時の回転降下率が違うため、その後の安定性に大きな影響を与えることが予想される。このため連係運転負荷 2,420kW

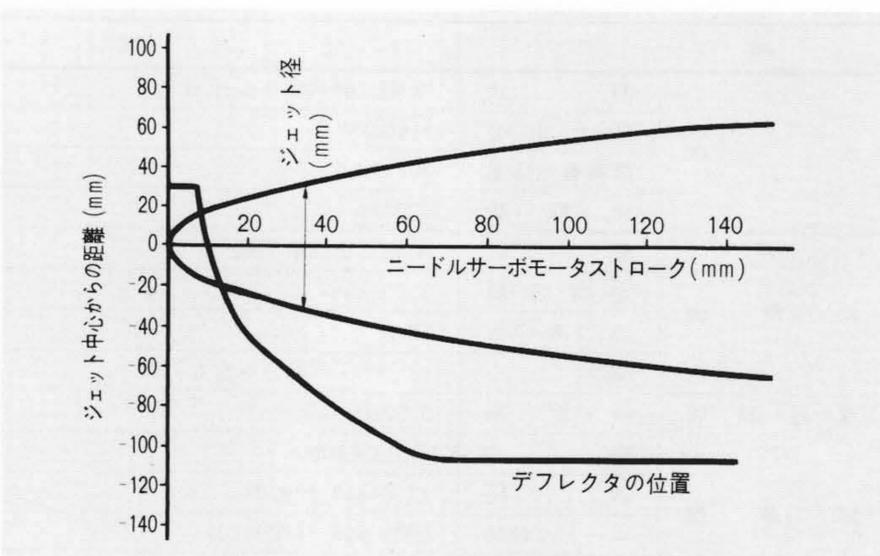


図2 ニードルとデフレクタの静的関係(草野川発電所ガバナ) ニードルの開度とそれに相当するジェット径およびデフレクタの位置を示す。

Fig. 2 Static Relation between Needle and Deflector (Kusanogawa Governor)

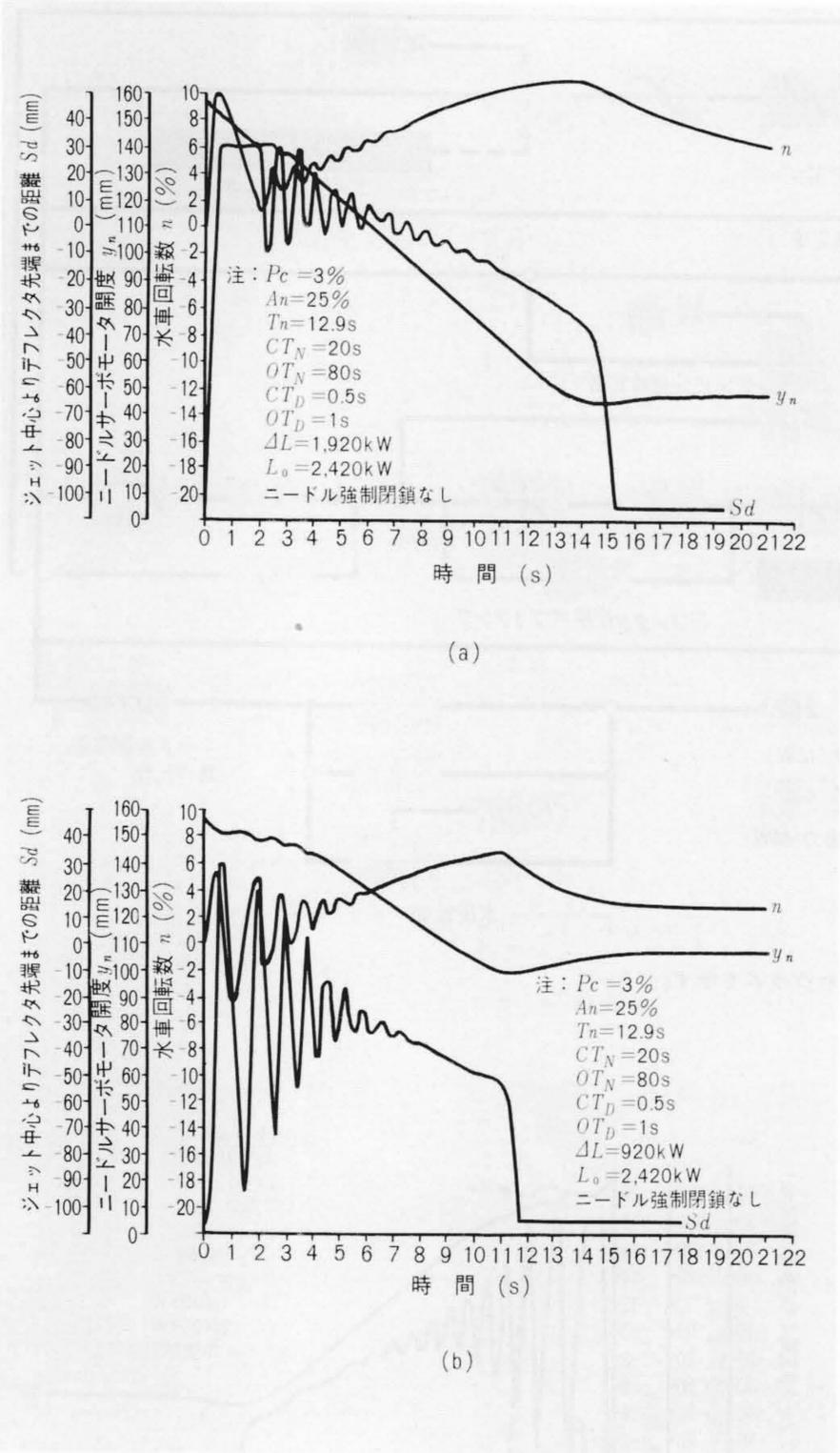


図6 負荷変化と安定性の関係(草野川発電所プラントの計算例) 単独負荷が小さいと回転降下率が下がるので有利である。
 Fig. 6 Relation between Load Decrease and Stability(Computer Study of Kusanogawa Plant)

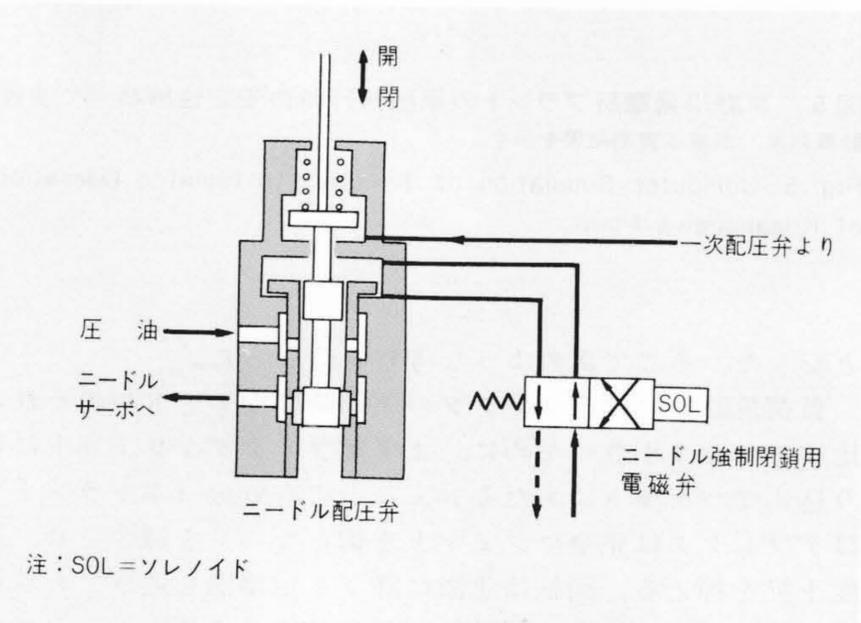


図7 ニードル強制閉鎖装置の例(草野川発電所ガバナ) ソレノイドを付勢してプッシュを上げておくと、プランジャの位置に関係なくニードルは閉じる。
 Fig. 7 Needle Distributing Valve with Compulsory Closing Device (Kusanogawa Governor)

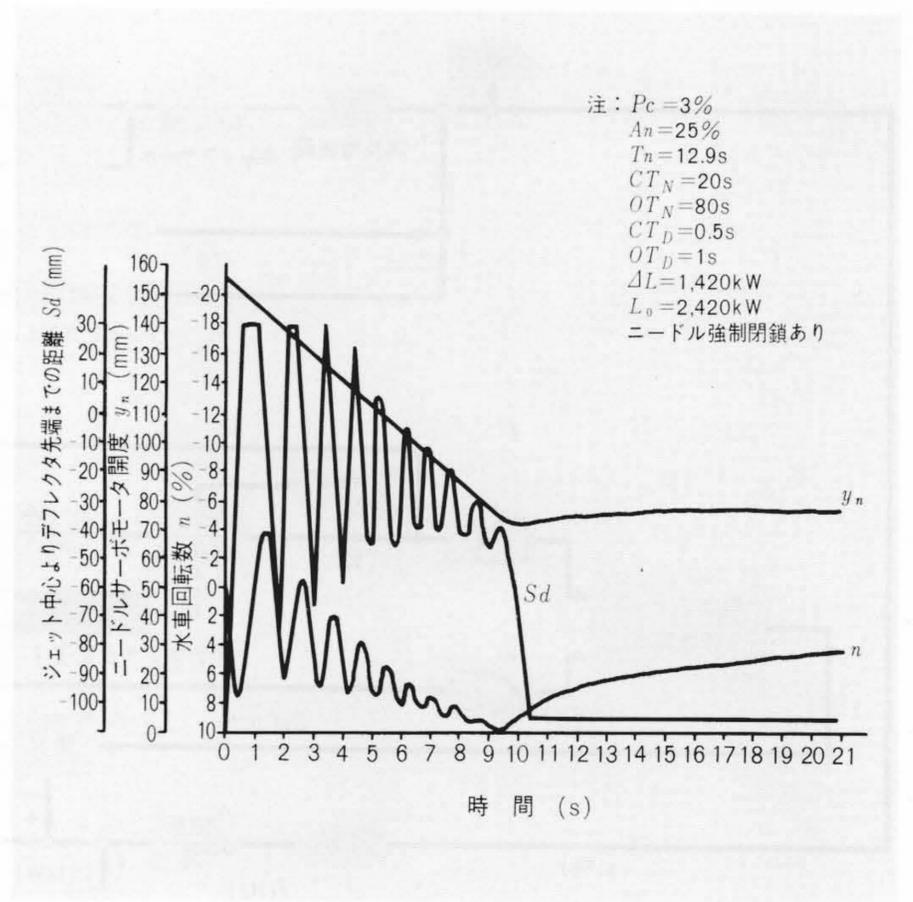
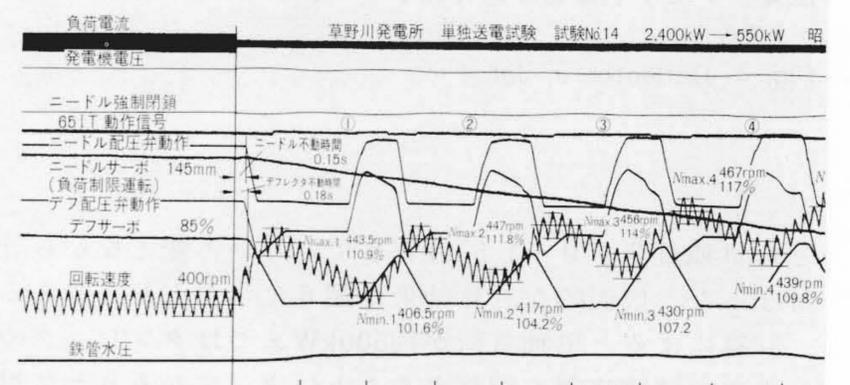
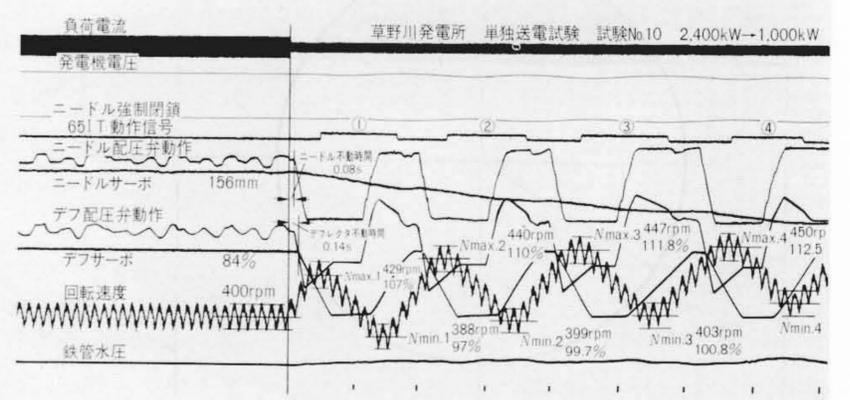


図8 ニードル強制閉鎖の効果の計算(草野川発電所プラント) ニードルはジェットの中でハンチングすることなく直線的に所望の負荷へと閉じる。
 Fig. 8 Study of Compulsory Closing of Needle(Kusanogawa Plant)



注: $P_c=3\%$ $T_n=12.9s$ $OT_N=80s$ $OT_D=0.5s$
 $A_n=48\%$ $CT_N=20s$ $CT_D=0.5s$

図9 草野川発電所プラントの対策結果(単独送電への移行) する開度まで直線的に閉じハンチングしない。
 Fig. 9 Oscillograph Charts of Transfer to Isolated Operation Modification

込んでいるときの水車出力 P は、

$$P = f_p(y_n, y_d) \dots\dots\dots(4)$$

のように 2 変数関数になる。

ところでデフレクタは早くジェットの外へ出るため開き、ニードルは変化後の負荷に相当する開度まで閉まって、**図 2** 本来の関係に復するべきであるが、上記のように回転降下に伴いニードルも開動作してしまう。この結果、ニードルの所望の開度への閉鎖が遅れるばかりではなく、場合によってはいつまでも高い開度にとどまりハンチングが止まらないことになる（約500kW以上の単独負荷への移行の場合）。

ガバナが常に速度制御状態、すなわち、

$$P = f_p'(n) \dots\dots\dots(5)$$

の関係を保持できれば、**図 2** の関係に強制的に復帰させても支障はないことに注目し、次の方法を考えた（特許出願中）。

デフレクタがジェット中に切り込んでいるときの水車出力 P は(4)式のように 2 変数関数であるが、デフレクタがジェット中にあることを条件にニードル y_n には(2)式の n に応答する速度制御動作をさせず、一定速度で強制的に閉鎖することにより P を y_d の一変数関数にしてしまう方法である。この間の速度制御はもっぱら(3)式の y_d に任せる。不安定なデフレクタ制御系に積極的に任せるのは一見矛盾するようであるが、デフレクタがハンチングを重ねジェットへの切り込み回数を重ねるだけニードルは閉まり、ジェットも細くなってハンチングの幅も単調減少するはずである。デフレクタがジェットの

外に出ればニードルの強制閉鎖は止めて、(2)~(4)式本来の関係にもどる。このとき、もはや(3)式は P に関しては影響を与えないので、 P は y_n の一変数関数となる。デフレクタがジェット中にあることを検出する方法は種々考えられるが、今回はニードルとデフレクタの位置関係のアンバランスで検出することにした。ニードルの強制閉鎖装置もいろいろ考えられるが、既納品の改造の都合で**図 7** のようにニードル配圧弁プランジャの外周にスリーブを追加することとし、これを電磁弁より操作することにした。

(4) 対策結果

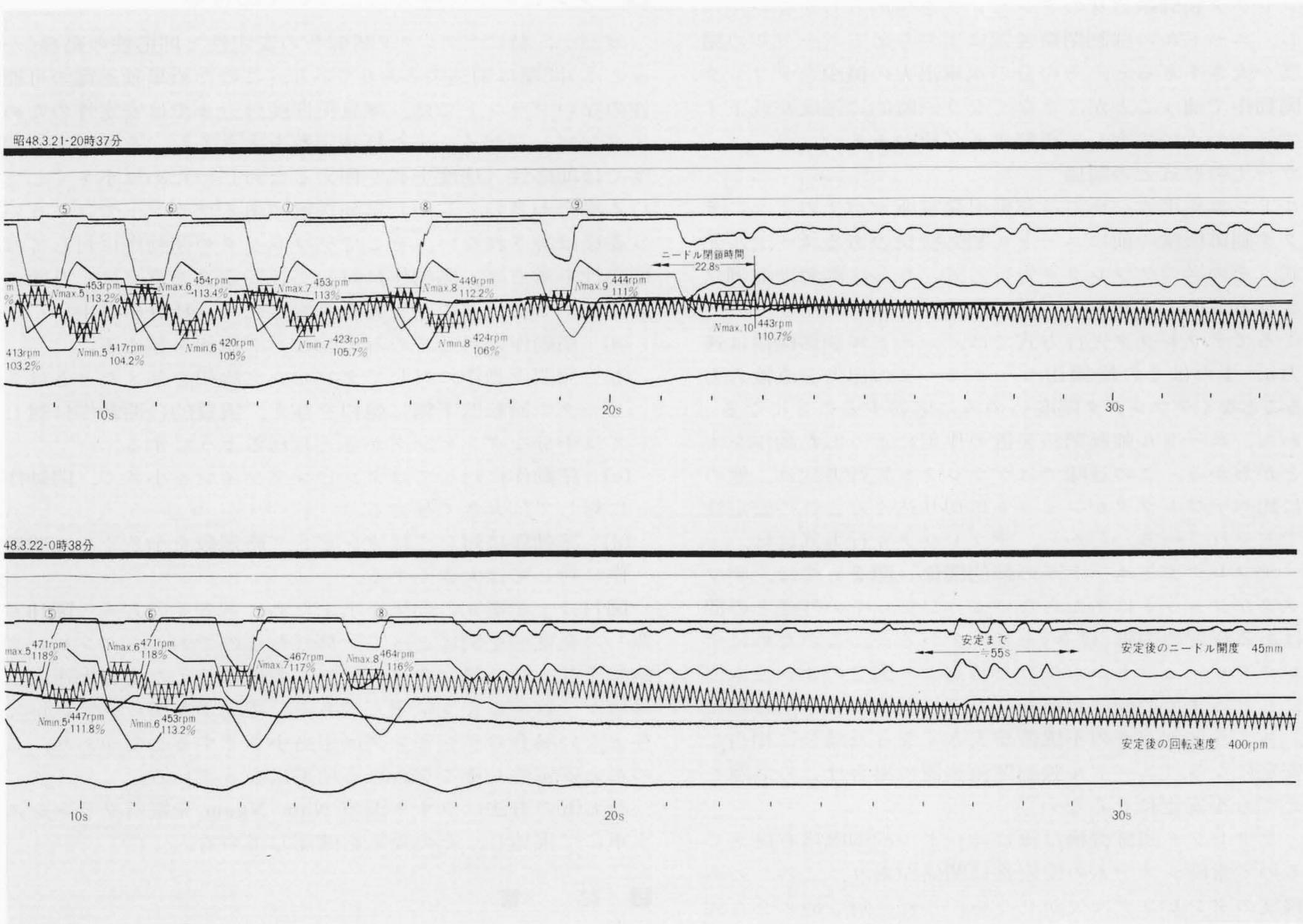
対策実施前にコンピュータで計算した。**図 8** は対策前の**図 5** に対応するもので、ニードルが所望の開度まで直線的に閉まっており、ハンチングを速く収斂(れん)させるのに顕著な効果が期待された。

対策の結果は**図 9** に示すように予期したとおりのものであった。現在は直接配電負荷の容量が小さく、約1,000kWまでしか確認していないが、将来この容量が大きくなっても影響はないものと推定される。

3 ニードルの強制閉鎖

(1) デフレクタ制御系との関係

ニードル強制閉鎖装置を付ければ草野川発電所の例のように一時的にハンチングが発生しても収斂が約束されるので、デフレクタ制御系単独の安定性に対する要求はかなり軽減で



ニードルは、変化後の負荷に相当

of Kusanogawa Plant after

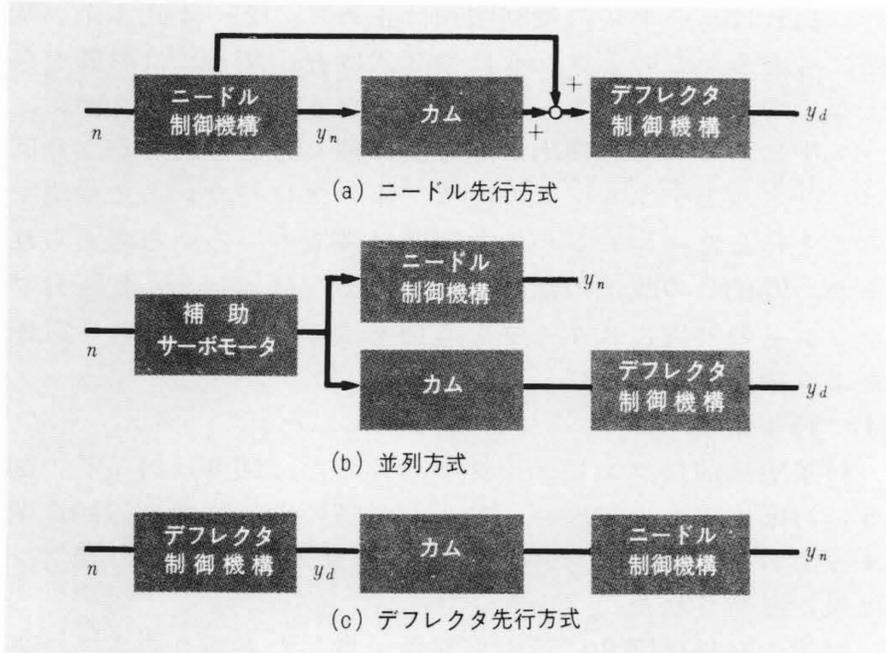


図10 ペルトン水車ガバナの制御方式 ニードル制御機構とデフレクタ制御機構の組み合わせにより三つに分類できる。

Fig. 10 Arrangement of Pelton Turbine Governor

きる。デフレクタ制御系の安定性は、即応性との矛盾関係の中で与えられることを考慮すれば、これは即応性、すなわち速度上昇値の低下につながることになる。しかし、デフレクタがジェット中にある間はシステムの安定性はデフレクタ制御系の安定性そのものであり、この間の安定性向上のためにはデフレクタ制御系自身のダンピングを強めるしかない。

なお、ニードルの強制閉鎖装置により与えるニードルの閉鎖速度が大きすぎると、その分の水車出力の減少をデフレクタの開動作で補うことができなくなり一時的に速度が低下するので、この点に注意して調整する必要がある。

(2) ガバナの形式との関係

ペルトン水車用ガバナには草野川発電所ガバナのようにデフレクタ制御機構の前にニードル制御機構のあるニードル先行方式、その逆のデフレクタ先行方式、さらに両者が並列に配置される並列方式がある (図10参照)。

ところでデフレクタ先行方式では、ニードル制御機構は速度入力 n 、またはその増幅用サーボモータの出力を直接入力されることなくデフレクタ開度 y_d のみに応答することになる。すなわち、ニードル強制閉鎖装置の作用によく似た動作をすることがわかる。この意味ではデフレクタ先行方式は、他の方式に比べデフレクタがジェットに切り込んだときの安定性の点ですぐれている。しかし、デフレクタ先行方式には、

- (a) デフレクタとニードルの静的関係 (図2) では、デフレクタがジェットにあたらないうジェットの外径との間にはある程度の間隙(げき)を与えているが、このためにデフレクタがジェットから抜けた時点より図2のオンカム位置にもどるまでの間は盲運転になる。間隙が大きいときには、ちょうどガバナの不感帯が大きくなった場合に相当し不安定になる (ニードル強制閉鎖装置の場合はこの間隙を与えても不安定にならない)。
- (b) デフレクタ制御機構は後にニードル制御機構を従えているので常時システムの安定性に関係があり、このためある程度のダンピングは欠かせない。これに対し他の2方式ではデフレクタ制御系に対する安定性の要求は比較的軽く即応性の面で有利である。
- (c) デフレクタとニードルの静的関係を決めるカムはかなり非線形になっているので、開度によってニードル制御系

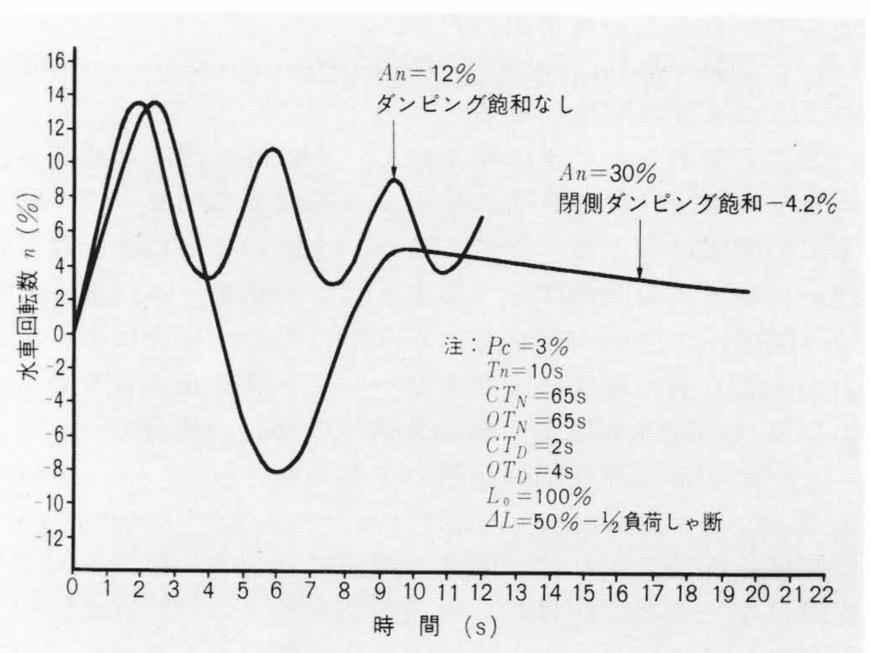


図11 ダンピング飽和要素の効果 ダンピングに閉側飽和を与えると速度上昇値(即応性)を同一に選んでも安定性を改善できる。

Fig. 11 Effect of Damping Saturation

の安定性が左右される。などの欠点がある。ニードルの強制閉鎖装置はこの矛盾関係を合理的に解決するものである。

4 ダンピングの与え方についての提案

ガバナ、特にデフレクタ制御系の安定性と即応性の葛藤(かっとう)問題は前述のとおりであり、このため単独送電の可能性のないプラントでは、無負荷開度付近までは安定性のためにダンピングゲインまたは時定数を大きくし、それ以上の開度では即応性(速度上昇を押えるため)のために小さくしている場合が多い。しかし単独送電のあるプラントではこういう妥協は許されない。そこでデフレクタの開動作に対しては即応性を重点に、開動作に対しては安定性を重点にした次のようなダンピングの与え方を提案したい(特許申請中)。

- (a) 閉動作に対してのみダンピング飽和を与える。
- (b) 開閉両動作に対してダンピング飽和を与えたときはスピーダの回転低下側に飽和を与え、実質的に開動作に対しては十分なダンピングが与えられるようにする。
- (c) 閉動作に対してはダンピングゲインを小さく、開動作に対しては大きく与える。
- (d) 閉動作に対してはダンピング時定数を小さくし、開動作に対しては大きくする。

図11は上記案(a)の効果を示すためにある並列方式(図10参照)の発電所を例にとって計算したものである。ダンピング飽和を与えない場合のダンピングの値は与えた場合と速度上昇値が一致するように選んである。本図より明らかのように、与えない場合のダンピングは相当小さくする必要があり、このため安定性がそこなわれる結果になっている。

なお(b)の方法はラオス国の Nam Ngum 発電所フランシス水車にて実施し、その効果を確認している。

5 結 言

ペルトン水車用ガバナ、特にデフレクタ制御系の安定性と即応性を両立させるために、ニードルの強制閉鎖とダンピングの与え方に関する提案を行ない、それらの効果を計算と実測により確認した。