

ファジィ論理を用いたポンプ運転制御方法

㈱日立製作所大みか工場 ○大音 透

1. まえがき

ポンプ運転に際して、オペレータはエネルギー消費量、水位変動ポンプ切戻回数、ポンプ運転効率など様々な評価因子を考慮した上で適切な切戻制御を行っている。これは一種の多目的制御といえる。

ポンプ運転制御の自動化方法として、従来、ダイナミックプログラミング法を用いる方法¹⁾が考案されている。しかし、この方法では評価因子がエネルギー消費量やポンプ切戻回数など定量的に記述できるものに限られ、定性的(あいまい)なもの扱えない。また、演算も複雑になる。

本論文では、オペレータのもつ多目的かつあいまいな評価機能^{2),3)}にもとづいた制御方策をモデル化することによって、ポンプの多目的制御を行う方法について述べる。この方法は演算が簡単なファジィ論理⁴⁾を用い、適応アルゴリズムによって運転ポンプ決定方策を順次修正していくことができる。

以下、オペレータの制御方策のモデル化方法、オペレータによる実運転データとこのデータにもとづいて作成した制御モデルによる運転結果との比較について述べる。

2. ファジィ論理を用いたポンプ運転制御モデル

2.1 制御モデル作成に必要なデータ

- (1) 水位 X の状態量 x_i と高い、低いなど x_i のレベル lx_i
- (2) 水位変化 Y の状態量 y_j と大きい、小さいなど y_j のレベル ly_j
- (3) 水位レベル lx_i に対する運転ポンプ P^k の運転優先度 $f(P^k, lx_i)$
- (4) 水位変化レベル ly_j に対する運転ポンプ P^k の運転優先度 $f(P^k, ly_j)$
- (5) ポンプの運転台数を定めるためのしきい値 T の修正幅 α
- (6) 優先度の修正幅 β
- (7) 過去にオペレータが行ったポンプ運転制御の結果(水位、運転ポンプ番号、運転時刻)

2.2 制御モデルの作成と改善

状態量 (x_i, y_j) に対する運転ポンプを決定するためのポンプ運転制御方策マトリクス(制御モデル)を以下の手順により作成・改善する。

(1) 時刻 t での水位レベル lx_i^t に対する運転ポンプ P^k の優先度 $f(P^k, lx_i^t)$ と水位変化レベル ly_j^t に対する運転ポンプ P^k の優先度 $f(P^k, ly_j^t)$ とをミニマム型ファジィ論理演算によって以下のように合成する。

$$g(P^k, lx_i^t, ly_j^t) = \min(f(P^k, lx_i^t), f(P^k, ly_j^t)) \quad (1)$$

g は状態量が x_i かつ y_j の場合の運転ポンプ P^k の優先度を示す。ミニマム型演算を用いるのは“かつ”という言葉に対応させるためである。本論文では、全ポンプの優先度を一つの式で表すため、次式を定義する。

$$\sum_k \left\{ g(P^k, lx_i^t, ly_j^t) / P^k \right\}^\Delta = g(P^1, lx_i^t, ly_j^t) / P^1 + \dots + g(P^n, lx_i^t, ly_j^t) / P^n \quad (2)$$

ここで、 P^1, \dots, P^n は運転ポンプ、 Δ は便宜上の記号である。

(2) 実運転データにおいて lx_i^t と ly_j^t に対応する時刻 t での実運転台数 m^t を調べ、しきい値 T よりも大きい $g(P^k, lx_i^t, ly_j^t)$ の個数 I が m^t と一致するように T を定める。すなわち、

$$I \left(\sum_k g(P^k, lx_i^t, ly_j^t) > T \right) = m^t \quad (3)$$

となる T を決める。この際スムーズな切戻を行うため、1単位時間前のポンプ運転台数 m^{t-1} を調べる。さらに、時刻 t 以前のデータ $(lx_i^{t-1}, ly_j^{t-1}, m^{t-1})$ を調べ、 (lx_i^t, ly_j^t, m^t) と比較する。 lx_i^t, ly_j^t, m^{t-1} がそれぞれ $lx_i^{t-1}, ly_j^{t-1}, m^{t-1}$ と一致している場合以外は、運転ポンプ決定条件が異なると思え、 T を決定する。一致している場合は、運転ポンプ決定条件は同じと考える。この場合は、実運転台数とモデルによって決定される台数との差が最小になるように T を決定する。

(3) 上記のしきい値 T により選出されるポンプ番号と実運転ポンプ番号とを比較し、それがことなる場合は、間違っ選ばれたポンプ番号の優先度を、選出すべきポンプ番号の優先度と入換える。ただし、現時点での状態(水位、

水位変化、または両方)の優先度を入換えれば、その状態と水位、水位変化または両方が一致している過去の状態についても優先度が入換わるため、選定されるポンプ番号が変更される。従って実運転ポンプ番号と選定されるポンプ番号との誤差台数も変る。優先度の入換えによって誤差台数が増加する場合は優先度の入換えは行わない。

(4) 優先度の入換えだけでは実運転ポンプ番号と選定されるポンプ番号とを一致させられない場合は、与えられた修正幅 β だけ優先度を修正する。ただし、(3)と同様、優先度の修正によって全体としての誤差が増加する場合は、優先度の修正は行わない。

以上の手順により、1単位時間前のポンプ運転台数 m^{t-1} 、および現時点での水位レベル l_t 、水位変化レベル $l_{t,j}^t$ に対して一つのしきい値 T が決まる。この関係を行列形式で表したものをポンプ運転制御方策マトリクス M と呼ぶことにする。 M により、ポンプ運転制御を行うことができ、 M は制御モデルとなる。ただし、切回数減少のため、同機種間での相互切換えは行わないものとする。

表1 水位レベルと運転ポンプ優先度

水位レベル	運転ポンプの番号						
	1	2	3	4	5	6	7
高い限界 VVH	0.9	0.0	0.9	0.9	0.9	0.0	0.0
非常に高 VH	0.45 (0.85)	0.85 (0.45)	0.9	0.8	0.5	0.0	0.5
高い H	0.25	0.8	0.9	0.7	0.7 (0.3)	0.0	0.1
普通 M	0.3 (0.6)	0.8	0.9	0.62	0.6 (0.5)	0.0	0.1
低い L	0.7 (0.9)	0.9 (0.7)	0.62	0.6 (0.4)	0.42 (0.4)	0.0	0.0
非常に低 VL	0.42 (0.55)	0.55 (0.4)	0.45	0.3	0.2	0.0	0.0
低い限界 VVL	0.4	0.35	0.32	0.2	0.3	0.0	0.1

3. 実運転データとの比較

あるポンプ場の実運転結果に対し、本方法を適用した結果を以下に示す。

3.1 結果

方法の適用に当り、本論文では、水位レベル、水位変化レベルを以下のように7段階に分けた。これは、人間の評価能力は5段階程度であるという心理学分野での研究結果に上下の極限レベルを加えたことによる。

- | | | | |
|-------------|---|-------------|-------|
| 水位レベル | } | 1. 高い限界 | (VVH) |
| | | 2. 非常に高い | (VH) |
| | | 3. 高い | (H) |
| | | 4. 普通 | (M) |
| | | 5. 低い | (L) |
| | | 6. 非常に低い | (VL) |
| | | 7. 低い限界 | (VVL) |
| 水位変化
レベル | } | 1. 正で大 | (PB) |
| | | 2. 正で中 | (PM) |
| | | 3. 正で小 | (PS) |
| | | 4. ほとんど変化なし | (NI) |
| | | 5. 負で小 | (NS) |
| | | 6. 負で中 | (NM) |
| | | 7. 負で大 | (NB) |

表2 水位変化レベルと運転ポンプ優先度

水位変化レベル	運転ポンプの番号						
	1	2	3	4	5	6	7
正大 PB	0.35	0.32	0.25	0.2	0.3	0.0	0.0
正中 PM	0.25	0.3	0.27	0.27	0.2	0.0	0.0
正小 PS	0.25 (0.4)	0.4 (0.25)	0.35	0.32	0.3	0.0	0.0
ほぼ0 NI	0.9	0.8	0.52 (0.7)	0.62	0.5	0.0	0.0
負小 NS	0.4 (0.6)	0.7 (0.7)	0.42	0.62	0.7 (0.4)	0.0	0.1
負中 NM	0.0 (0.2)	0.2 (0.0)	0.2	0.2	0.2	0.0	0.1
負大 NB	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0

表3 ポンプ運転制御方策マトリクス

水位変化 レベル	NB	NM	NS	NI	PS	PM	PB
VVH							
VH				0, 0.63 3, 0.46 4, 0.46	3, 0.31 4, 0.26		
H			3, 0.43 4, 0.26 5, 0.11	1, 0.53 2, 0.51 4, 0.26 5, 0.01	2, 0.26 4, 0.26	0, 0.28 3, 0.26	
M			3, 0.43 4, 0.31 5, 0.11	1, 0.63 2, 0.51 3, 0.51 4, 0.53 5, 0.01	0, 0.41 1, 0.36 3, 0.31 4, 0.31	3, 0.21	
L		4, 0.11	2, 0.43 3, 0.43 4, 0.41 5, 0.41	0, 0.81 1, 0.71 2, 0.71 4, 0.43 5, 0.41	0, 0.41 1, 0.36		2, 0.26
VL			1, 0.43 2, 0.41	0, 0.56 1, 0.46 2, 0.43	1, 0.41 2, 0.31		
VVL			1, 0.36	0, 0.41 1, 0.36	2, 0.31		

各水位レベルおよび水位変化レベルに対応する運転ポンプ優先度をそれぞれ表1と表2に示す。表中()内の値は修正前の優先度で、()がないわくは優先度修正が不要であったことを示す。また、しきい値 T の修正幅 α と優先度の修正幅 β はそれぞれ0, 0.02とした。

表3は、水位レベル、水位変化レベル、1単位時間前のポンプ運転台数に対するポンプ運転制御方策マトリクスで表4~6に示す実運転結果を用いて作成したものである。各わく内左側の数値は、1単位時間前のポンプ運転台数を示し、小数表示の値はしきい値を示す。

90個のサンプルデータについて、各種水位および水位変化における実運転結果とミニマム型ファジィ論理演算 (Minimum-type Fuzzy Logic Operation) を用いた

表6 各種水位および水位変化における実運転とMFLO制御による運転との比較

サンプル No.	サンプルデータ		オペレータによる実運転					MFLO制御による運転					誤差 台数			
	水位 レベル	水・変 レベル	ポンプの番号					ポンプの番号								
			①	②	③	④	⑤	6	7	①	②	③		④	⑤	
61	L	NI														
62	L	NI	○													1
63	L	NI	○								○					
64	M	PS									○					
65	M	NI	○	○							○					1
66	M	NI	○	○		○					○	○	○			△
67	M	NI	○	○		○					○	○	○			△
68	M	PS	○	○	○	○					○	○	○			1
69	H	PS	○	○	○	○					○	○	○	○		
70	H	NI	○	○	○	○					○	○	○	○		
71	M	NS	○	○	○	○					○	○	○	○		
72	L	NM	○	○	○	○					○	○	○	○		
73	L	NS	○	○	○	○					○	○	○	○		
74	L	NS	○	○	○	○					○	○	○	○		2
75	VL	NS	○	○							○	○				
76	VL	NI	○	○							○	○				
77	VL	NI	○								○	○				1
78	VL	NI	○								○	○				
79	VL	NI	○								○					
80	VL	PS														
81	VL	NI														
82	L	PS														
83	L	NI														
84	L	NI														
85	L	NI														
86	L	NI														
87	L	NI														
88	L	NI														
89	L	NI														
90	L	NI														

(注) 表中、①, ②のポンプは同機種であることを示す。又、○は運転ポンプを示す。

参考文献

- 1) 松本、嶋内：“ペナルティ付ダイナミック・プログラミングの開発とポンプ台数制御を含む水系の最適配分計画への適用”、昭50電気学会全国大会、1536/1537(昭50)
- 2) 古河、他：“多次元量のFuzzy論理一次元化法”、計測自動制御学会論文集、11、5、508/514(昭50)
- 3) 古河、他：“あいまいデータ処理方法の一研究”、電子通信学会論文誌、62-A、1、97/102(昭54)
- 4) P.J.King et al.：“The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial process”、Automatica、13、235/242(1977)