

VVVF기를 기초한 變頻式氣壓給水設備의 自動制御 문제

朴龍奎

中國 航空航天工業部第一研究院十五所

Automatic Control Problems of VVVF Converter-Based Variable-Frequency Type Air-presurized water Supply Equipment

Longkui Piao

15th Research Institute of First Academy of Aerospace Industry, PRC

ABSTRACT

The variable-frequency type water supply equipment, which adopts the variable-voltage and variable-frequency converter(VVVF converter) to govern automatically the rotating speed of a pump, can save 15-20% of power, as compared with a throttle-controlled pump device or an air-presurized water supply equipment, and is finding a wide application. However, it still has some disadvantages: greater pressure fluctuations during switching over the pump and prolonged low-efficiency running of the pump in the case of small consumption of water. Therefore, it is difficult to apply the equipment to the fire water supply system where the water should not be put into use unless a fire takes place, and the water pressure in pipelines should permanently remain constant.

This paper introduces the automatic regulation principle of the variable-frequency type air-presurized water supply equipment (hereafter referred to as simply BPQS equipment) for dual purposes of daily life and fire control, which combined both technologies of speed governing by a converter and air-presurized water supplying, then discusses some problems related to automatic control, and finally gives the experimental results of an embodiment-BPQS-100-50 water supply equipment.

1. 서론

VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)기로써 펌프의 회전 속도를 조절하는 變頻式給水設備은 전력소비가 節流調節 펌프 장치나 氣壓式給水設備보다 15~20% 가량 절약되기에 널리 보급되고 있다. 허나 아직까지 펌프 전환시기(切换時期)의 심한 압력파동문제와 미량용수(微量用水)기간의 장기적 低效率運轉 문제들이 존재하며, 평시엔 도관압력을 유지하고 저수(貯水)를 못쓰게하는 消防給水系統에 사용하기 어렵다.

本文은 변빈조속(變頻調速)과 기압급수(氣壓給水) 두기술을 결합하여 以上の 문제들을 해결하며 生活, 消防兩用하는 變頻式氣壓給水設備. 약칭 BPQS 설비의 自動調節原理를 소개하고 그 自動制御 문제들을 토론한 다음 구체설례로 BPQS-100-50형 설비의 實驗結果를 보여준다.

2. BPQS설비의 自動調節原理

그림1과 2에서 보는바 BPQS설비의 自動調節原理는 다음과 같다.

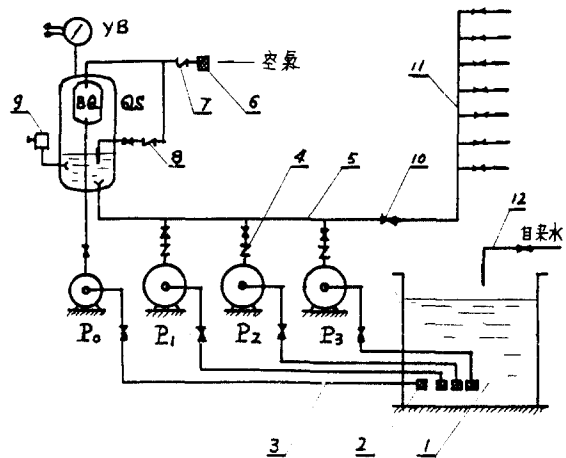


그림 1. BPQS 설비의 수력계통

Fig. 1 Hydraulic system of BPQS equipment

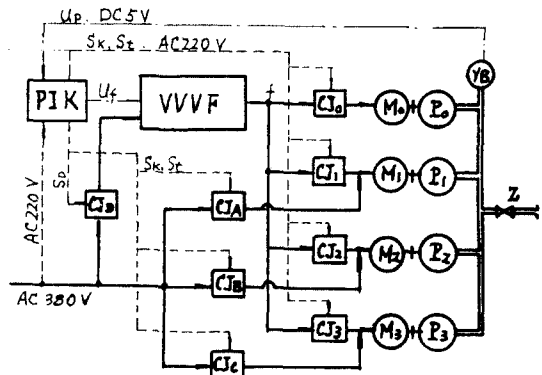


그림 2. BPQS설비의 자동제어 전로

Fig. 2 Automatic control circuit of BPQS equipment

1) 설비를 자동제어상태로 설치할때 PIK제어기는 수선 交 流接觸器 CJ₀와 CJ₁을 접속시켜 전기동력을 VVVF기에 투입 하며 M₀모터를 변빈조속하니 P₁펌프는 변속조절(變速調節) 상 태로 운전됨. 이때 저수조1의 물은 펌프흡입변2, 흡수관3을 거쳐 P₁ 펌프에서 승압된후 補氣탱크 BQ와 역지변8을 거쳐 氣 壓水탱크 QS안으로 유입. 그 결과 QS탱크안의 水位는 높아지 며 그속의 공기를 압축하는 동시 승압된 탱크물은 계속 上水 管5를 거쳐 用水管11로 흐름.

2) 용수유량(用水流量) Q_u가 P₁펌프의 最大流量 Q_{max}를 초 과하면 압력변송기(壓力變送器) yB가 측정 한 상수관의 압력신 호 U_p (즉 귀환신호)는 PIK제어기내에 設定한 基準壓力信號 U_{p0}보다 적다. 게다가 VVVF기의 輸出週波數 f가 이미 工頻 f_g(공업용 교류전기의 주파수, f_g=50Hz~60Hz)에 도달되었다면 이때의 PIK의 輸入信號差 ΔU=U_p-U_{p0}>0은 감소되지 않음. 때 문에 PIK도 다음 펌프의 기동신호(起動信號) S_k(driving signal)를 발생하여 CJ₁을 절단하고 CJ₂를 접속. 허니 VVVF기의 수출 단엔모터 M₀이 M₁로 바뀜. 이때부터 저수조 1의 물은 다시 QS 탱크를 걸치지 않고 직접 P₁펌프에서 승압된후 역지변4를 열고 상수관5를 걸쳐 용수관 11로 흐름.

3) P₁, P₂, P₃ 들은 規格이 똑같은 펌프인데, 그들의 最低 流量을 Q_k, 變頻流量을 Q_f, 最低變頻流量을 Q_t라 표시한다면 Q_k>Q_f>Q_t 용수유량 Q_u의 변화로 펌프의 유량상태가 매번 Q_f=Q_k로 되면 PIK 제어기는 S_k 신호를 발생하여 VVVF기의 수출 단에서 운전중의 펌프를 절단시켜 工頻恒速상태로 전환시킨후 다음의 펌프를 투입시켜 변빈조속함. 그 반대로 매번 Q_f=Q_t로 하강되면 PIK는 切斷信號(Disconnect signal)를 발생하여 운전 중의 펌프를 절단시키고 다음의 工頻恒速상태펌프를 VVVF기 에 투입시켜 변빈조속상태로 조절함. 이런 동작과정을 총괄하 여 BPQS설비의 BP운전상태라하는데 그 구체프로그램은 다음 과 같음.

表 1. BP 운전상태의 프로그램

Table 1. Program of running in mode of BP

用水流量	压差信号	信号	交流接觸器	变频电机	工頻电机
Q _u	ΔU=U _p -U _{p0}	S ₁	CJ ₁	M ₁	M ₀
Q _u >Q _{0k}	ΔU>0	S _k	CJ ₁	M ₁	-
Q _u >Q _k	ΔU>0	S _k	CJ ₂ , CJ ₄	M ₂	M ₁
Q _u >2Q _k	ΔU>0	S _k	CJ ₂ , CJ ₄ , CJ ₆	M ₃	M ₁ , M ₂
Q _u >3Q _k	ΔU>0	S _k	CJ ₄ , CJ ₆ , CJ ₈	-	M ₁ , M ₂ , M ₃
Q _u <3Q _k	ΔU<0	S _t	CJ ₃ , CJ ₄ , CJ ₆	M ₃	M ₁ , M ₂
Q _u <2Q _k +Q _f	ΔU<0	S _t	CJ ₂ , CJ ₄	M ₂	M ₁
Q _u <Q _k +Q _f	ΔU<0	S _t	CJ ₁	M ₁	-
Q _u <Q _t	ΔU<0	S _t	CJ ₀	M ₀	-
Q _u <Q _{0t}	ΔU<0	S _t	-	-	-

4) 용수유량 Q_u가 P₁펌프의 最低變頻유량 Q_t이하되어 PIK 제어기가 S₁신호를 발생하여 P₁ 펌프마저 절단시킨후 QS 탱크 내 공기의 압축작용으로 계속 미량급수하는 이 상태를 BPQS 설비의 QS 운전상태라 한다. 기존 기압급수설비들과의 주요 차별은, 언제나 PIK내에 설정된 양수고도 H₁이하에서 운전되 어 초압현상을 극복하며, P₁펌프를 다시 기동시켜 QS탱크에 물을 보충할때도 M₀모터를 변빈조속하여 QS상태의 매시간 循 環動作次數를 절감. 이외 기타 循環動作原理, 空氣의 自動補 充과 排出등은 기존설비들과 같으니 구체설명은 그만 생략한 다.

다음 그림3에 근거하여 변빈조속펌프의 恒壓給水原理를 계 속 설명

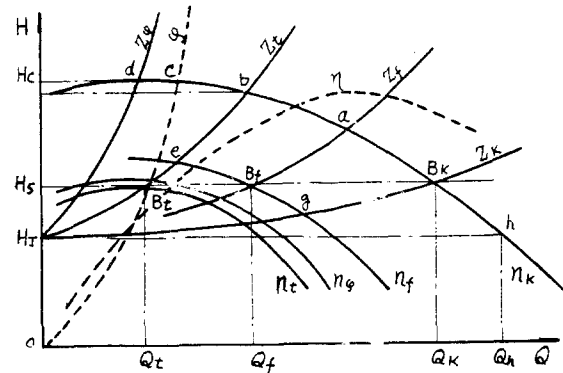


그림 3. 변빈조속펌프의 동작특성

Fig. 3 Operating characteristics of converter-governed pump

그림속의 η₀, η₁, η₂ 등 곡선은 그 회전속도때의 펌프특성, 곡선 η₃ 속도때의 펌프효율, 곡선 C는 駝峯點 C를 경과한 펌프 의 等效特性. 水平線 H_s-PIK내에 設定한 基準揚水高度, H₁-건축 물의 最高靜水高度. 그 이외의 Z_k, Z_f, Z_g 등 곡선은 용수관 11을 포함한 상수관의 총도관저항특성.

그 수학 方程式은

$$Z = 8.263 \times 10^{-3} \left[\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i + \sum_{j=1}^m \zeta_j \right) + \zeta_v \right] / D^2, S^2/m^5 \quad (1)$$

式中 λ, λ_i 상수관 各段의 도관저항계수 ;
 l_i 상수관 各段의 當量長度, m ;
 ζ_j 상수관 各處의 局部저항계수 ;
 D 상수관 S의 직경, m ;
 ζ_v 가입자 밸브의 저항계수

以上 파라메터중 ζ_v 이외는 모두 常數들이니 Z는 다만 ζ_v 로 인해 변화됨. 이때의 용수유량은

$$Q_u = [(H_s - H_1) / Z]^{0.5}, m^3/S \quad (2)$$

고로, 가입자 밸브를 점차 잠그면 ζ_v 계수가 커지어 도관저항 특성Z는 그림에서처럼 Z₀>Z₁>Z₂>Z_k 左側으로 높아진다. 이런 때 工頻恒速펌프의 동작점은 η₁선은 따라 B₁→a→b→c→d

로 변화되니 양수고도는 높아지되 펌프의 배출유량은 적어짐. 이것이 節流調節方式이라 그 전기 소비량은 n_k 곡선이 포위한 면적에 해당됨. 허나 變頻調速펌프의 동작점은 수평선 H_1 부근에서 微小變化되어 그 전기소비량은 H_1 선이하의 矩形面積에 해당되어 n_k 곡선 면적보다 적음. 이것이 바로 變頻式給水設備의 動力節約原理라 함.

다음 變頻調速펌프의 동작점운동과정을 계속 고찰하자.

가령 용수유량이 $Q_u=Q_r$ 인데 가입자 밸브를 틀어서 도관저항특성을 $Z_r \rightarrow Z_k$ 로 감소되었다면, 수선 펌프-모터의 慣性滯延作用으로 동작점 B_1 는 n_1 곡선을 따라 g 점으로 하강. 이때의 양수고도 H_1 는 H_2 보다 낮아서 yB 가 측정된 귀환신호 $U_p < U_r$, $\therefore \Delta U = U_r - U_p > 0$, PIK는 이 신호차에 근거하여 VVVF기의 수출 주파수를 향상시켜 모터의 회전속도를 $n_1 \rightarrow n_k$ 로 증가하니 펌프의 동작점은 Z_k 선을 따라 계속 g 점에서 B_k 점에 도달. 결과 $\Delta U = U_r - U_p = 0$, $Q_u = Q_r$, B_k 점은 Z_k 특성때의 안정 동작점으로 되었음.

반대로 가입자의 용수유량을 감소하려 도관저항특성 $Z_k \rightarrow Z_r$ 로 향상시키면, 펌프의 동작점은 $B_k \rightarrow a \rightarrow B_r$ 로 운동함. 이처럼 용수유량이 변화될때 도관저항특성의 변화속도 d_t/d_1 는 언제나 펌프속도변화 d_t/d_1 보다 앞서니 상수관의 실제 양수고도 H_1 는 언제나 H_2 선 부근에서 변함. 이 양수고도차 $\Delta H = H_2 - H_1$ 를 變頻調節의 超調量 (over modulation)이라하는데 d_t/d_1 속도가 클수록, 상수관 緩沖作用이 적을수록 이 超調量은 더욱 심히 변함. 때문에 上水管에 入水탱크 QS를 연결시켜 될수록 ΔH_1 를 감소시키김.

3. 자동제어에 관한 몇가지 문제

BPQS설비는 VVVF기를 기초하여 恒壓給水함으로 健全성 향상을 위해 日本 SANKEN 株式會社の SVF기들을 사용하며 그 제어신호단자중 VRC, GND 단자간에 調頻信號 U_r (Regulate frequency signal)을 수입시켜 수출 주파수를 개변시키고, EMG, COM 단자를 이용하여 VVVF기를 기동 정지했음.

허나 以上の 자동조절과정에서 보느바 일체동작은 PIK 제어기의 指令하에서 집행되니 이 제어기의 설계가 제일 중요한 문제로 되었음.

1) 調頻信號 U_r 발생문제 그림2에서 보느바 PIK는 열린환로로 VVVF기를 조절하며 QS탱크의 기체압력신호 U_p 를 귀환신호로 하니 U_r 신호는 더욱 정밀해야하며 게다가 BPQS설비는 일체 VVVF기와 펌프 규격들에 通用할수 있는 PIK 제어기를 요구하니 복잡한 자동제어 수학방법을 그만두고, 현대공업에서 사용하는, PID증폭기(PID Amplifier)를 선택하되 펌프-모터의 관성지연과 QS 탱크의 緩沖作用이 크니 微分완전D를 최소한 그림4와 같은 PI 比例積分증폭기를 사용한다.

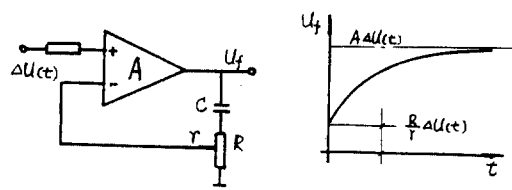


그림 4. PI 比例積分증폭기

Fig. 4 PI Amplifier

이때 PIK內的 기준압력신호 U_r 와 yB 가 측정된 귀환신호 $U_p(t)$ 간의 $\Delta U(t) = U_r - U_p(t)$ 를 輸入量으로 할때 증폭기의 輸出量은

$$U_r = K_p \Delta U(t) + K_i \int_0^t \Delta U(t) dt, \quad V \quad (3)$$

式中 $K_p = R/r$ - 比例係數, $K_i = 1/C$ - 積分係數

허나 설비의 現場調節當時 전위차기의 분압저항 r 를 조절하여 적당히 K_p 와 K_i 계수를 설정한다면 아주 간편히 자동제어 상태의 안정성을 향상시키며 超調量 ΔH_1 와 振盪次數를 감소할 수 있다.

2) 기동신호 S_k 와 절단신호 S_1 의 발생 문제.

表1에서 보느바 매개모터의 동작은 모두 S_k, S_1 신호하에서 제어되었다.

S_k 신호는 PI 증폭기의 수출량이 $U_r = U_k = 5V$ 승가되고 VVVF기 수출 주파수도 工頻 $f = 50Hz$ 에 도달되었을때 대략 $\tau_k = 2-4S$ 를 기다려 발생하면 되나, S_1 신호는 반드시 PI증폭기의 수출량이 아래의 공식에 하강되기 전에 발생해야 된다.

$$U_r = U_{Bk} \sqrt{\frac{H_k}{H_c}}, \quad 5 \sqrt{\frac{H_k}{H_c}}, \quad V \quad (4)$$

式中 H_c - 펌프의 駝峯點양수고도,

$U_{Bk} = 5V$ - PI증폭기의 최고수출량

만약 이때를 지나서 그림3처럼 펌프동작점이 Φ 곡선 左側에 처한다면 용수유량이 적을수록 펌프속도 n_p 는 n_1 보다 높아지니 S_1 신호발생이 어렵게 되고 펌프는 低效率상태에서 장기간 운전되어 동력낭비가 심해진다. 이현상을 변빈조속펌프의 탈조 (Dislocation) 상태라 하는데 기존 變頻給水設備들에 이 문제가 보편화되었다.

3) 펌프상태절환시기 VVVF기의 過負荷와 再生電壓충격문제

S_k 신호를 발생하여 VVVF기 수출변에서 예로서 모터 M_1 를 절단시키고 정지상태의 M_2 모터를 급히 투입한다면 過負荷현상이 발생하고, S_1 신호 발생후 M_2 모터를 절단시키고 工頻상태의 고속모터 M_1 를 低頻상태의 VVVF기에 투입시키면 M_1 모터의 고압 재생전기가 送何하여 충격함. 이때면 VVVF기는 급히 자동정지되고 마니 BPQS 설비는 단순한 節流調節펌프장치로 되어버린다.

이 문제의 간단한 해결방법은 매번 S_k, S_i 신호 발생당시 펌프상태 전환시간을 $\tau_i \approx 3-5S$ 지연시켜 VVVF기의 수출주파수와 펌프의 속도를 하강시킨다음, 零對零 상태에서 VVVF기에 펌프를 투입시킨다.

그림5는 以上 세계문제를 고려한 S_k 신호 발생, 동작과정을 설명했음.

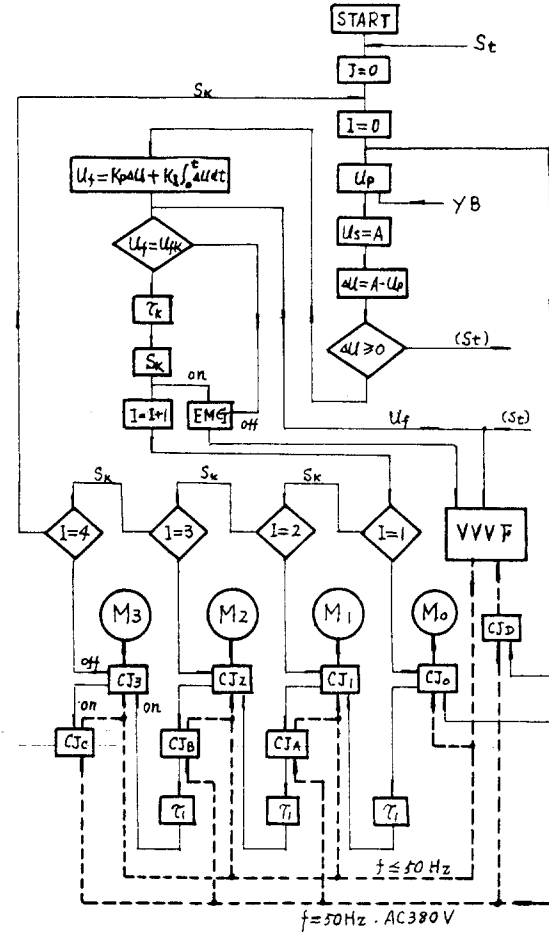


그림 5. PIK의 S_k 신호 제어 과정
Fig.5 Control program of PIK at the moment of sending a signal S_k .

4) 滯延時間內的 심한 압력파동 문제 - 기존설비들의 통행 以上에서 제기한바, 매번 S_k, S_i 신호 발생 전후 τ_k 와 τ_i, τ_e 와 τ_2 등의 지연시간이 필요하나 만약 수력계통의 緩沖作用이 없다면 필연코 이시간내의 유량변화로써 압력변화는 수격작용이 덧붙기에 아래공식을 초과함.

$$\Delta P \geq \pm 0.01 Z_k Q_k^2, \text{ MP.} \quad (5)$$

때문에 BPQS설비는 氣壓水탱크 QS를 사용하는데 탱크容積은

$$V_Q \geq \frac{Q_k \tau}{\alpha} \left(\frac{H_k}{\Delta H_f} - 1 \right), \text{ m}^3 \quad (6)$$

式中 τ - 펌프전환의 지연시간, α - QS탱크의 기체용적비.

가령, $H_k=50\text{m}$, $\tau=5S$, $Q_k=0.01\text{m}^3/S$, $\alpha=0.8$ 이라면 압력변화를 $\Delta H_f=\pm 2\text{m}$ 로 제한하기 위한 탱크 용적 $V_Q=1.5\text{m}^3$ 기존 氣壓給水設備용적의 10분의 1에 지나지 않음.

5) QS상태의 매시간 循環動作次數

그림3에서 보는데, BPQS설비를 도관 저장특성 Z의 B,점에서 氣壓給水상태로 전환시켰을때, 만약 M_0 모터를 工頻恒速하면 P, 펌프의 동작점을 $B_1 \rightarrow H_j \rightarrow h \rightarrow B_k \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow e \rightarrow B_1$ 로 循環되어 압력과 유량변화가 심하고 동력소비도 크며 펌프의 기동차수는 매시간에 몇십번되어 건실성을 상실. 때문에 이 QS 상태에도 BPQS설비는 M_0 모터를 계속 변빈조속시켜 n_1 이하 속도로 제어함. 이때 펌프동작점을 $B_1 \rightarrow H_j \rightarrow H_s \rightarrow B_1$ 로 循環되어 압력, 유량변화가 적고 매시간 循環次數는

$$N_f \leq \frac{H_p}{H_k} \frac{H_s - H_p}{H_s - H_j} \frac{Q_i}{\alpha V_Q}, \text{ 次/h} \quad (7)$$

$$H_p = H_j + Z_k Q_k^2 / 3, \text{ m} \quad (8)$$

이때의 펌프기동차수는 工頻恒速때의 20~25% 밖에 되지 않음.

상술한 문제이외, 消防信號접수후의 압력항상, PIK제어기의 구제기술방안, 건실성처리등 문제들은 篇幅관계로 생략함.

4. BPQS설비의 구체설계 - BPQS-100-50형 설비의 실험결과

1991年 8月. 北京市土木建築學會의 기술감정을 마친 이 설비의 주요파라미터는 아래와 같음.

- 1) 最大給水流量 : 生活用, 100m³/h;
消防用, 75m³/h;
- 2) 給水壓力 : 生活用, 0.48MPa;
消防用, 0.57 ~ 0.6 MPa;
- 3) 動力소비 : 主 펌프, 3X7.5 KW;
P, 펌프, 3.0 KW;
- 4) PIK 제어기 : 單片數值計算機
- 5) VVVF 기 : SVF-113;
- 6) QS 탱크 용적 : 0.93m³, ($\alpha=0.8$)
- 7) 제어방법 : 手動操作十自動制御

表 2. BPQS-100-50 형 설비의 실험결과

Table 2. Test results of BPQS equipment

№	内 容	符号	单 位	设计值	实测值
1.	变频调速状态				
1.1	最大给水流量	$3Q_k$	m/h	90~100	93
1.2	设定压力	P_s	MPa	0.475	0.475
1.3	调频范围	f	Hz	33~50	33~50
1.4	S_k 压力变化	ΔP_k	MPa	-0.03	-0.02
1.5	S_t 压力变化	ΔP_t	MPa	+0.02	+0.01
2.	气压给水状态				
2.1	P_0 泵流量	Q_{0k}	m/h	8~9	8.4
2.2	调频压力	P_{of}	MPa	0.475	0.475
2.3	停泵点压力	P_{ot}	MPa	<0.50	0.48
2.4	开泵点压力	P_{ok}	MPa	0.38	0.38
2.5	循环次数	N_f	次/小时	<12	9
3.	消防给水状态				
3.1	最大给水流量	$3Q_x$	m/h	70~75	75
3.2	消防给水压力	P_x	MPa	0.58	0.58
3.3	S_k 压力变化	ΔP_{kx}	MPa	-0.03	-0.02
3.4	S_t 压力变化	ΔP_{tx}	MPa	+0.03	+0.02

5. 맺는 말

BPQS-100-50형 설비의 실험결과는 本文의 正確性여하를 보여준다. 이 설비는 本文 作자의 기술특허(특허출원중 91, 201535.7) 인데 現금(中外合資) 長城—瑞光給水机有限公司, 北京長城給水設 에서 소량 생산 보급중이지만 VVVF기의 原價를 낮추고 PIK제어의 견고성을 더욱 향상시켜야만 이설비들을 더욱 넓게 보급시킬수 있다.

참 고 문 헌

- (1) 核工業部第二研究設計院, 主編, "給水排水設計手冊" 第2册, pp 30-42, 中國建築工業出版社, 1986.
- (2) 机械, 申机工程手冊編委會, 主編, "机械工程手冊", 第2卷 第7篇 第11章, 國防工業出版社, 1982.
- (3) T.E. 佛特曼著, 呂林等譯, "线性控制系統引論", 第九章, 机械 工業出版社, 1980.