

重複分散制御方式による配水管網の圧力定値化

㈩日立製作所大みか工場 四宮 文人

// システム事業部 ○嶋内 繁行

㈩日立コントロールシステムズ 林 志信

1. はじめに

都市上水道においては、省資源、省エネルギーを目指した運用制御の要請が強く、特に配水系統における圧力適正化の制御は、漏水低減などの効果が大きいことから、その実現が期待されている。配水管路網の役割は、全ての需要家に上水を安定して供給することである。これは、圧力計あるいは流量計から入手した計測情報をもとに、管路網の圧力や流量をバルブやポンプで制御することによって達成されるが、人口増加等に伴う管路網拡張への対応といった柔軟性、あるいは、配水制御システムの信頼性確保など制御系の構成への配慮が重要になってきている。

このような状況に対し、本報告では、配水管路網の圧力定値化を複数個のマイクロコンピュータで実行する分散配水制御方式を提案する。このような制御系の分散化構成は、制御系の段階的構築が可能、あるいは、信頼性確保の容易化という優れた面を持つ。

これを実現するためには、個々の制御器のロジックとしてどのような方式をとるべきか、さらに、個々の制御器が守備すべき管路網領域をどのように決定すべきか(分割)という問題を解決する必要がある。この観点から、本報告では、制御量の操作量に対する感度行列から管路網を分割し、分割結果であるサブシステムにおいては、配水管路網の部分的な線形モデルを持つ適応制御器を置くという方式をとる。

2. 重複分割法

2.1 配水制御問題の定式化

配水管路網の物理的特性は、非線形の管路網方程式としてつぎのように表わせる。

$$f(x_C(k), u_V(k), u_D(k)) = 0 \quad (1)$$

ここで、 $x_C(k) \in R^f$: 管路補水流量、 $u_V(k) \in R^n$: バルブ抵抗係数(操作量)、 $u_D(k)$: 需要量。
管路網内の圧力計から情報が得られるという構造はつぎの式で表わせる。

$$Z(k) = h(x_C(k), u_V(k), u_D(k)) \quad (2)$$

ここで、 $Z(k) \in R^S$: 計測情報。

配水制御の目的を圧力定値化であるとすれば、つぎのように制御指標を選ぶことができる。

$$J = (Z_0 - Z(k))^T (Z_0 - Z(k)) \quad (3)$$

ここで、 $Z_0 \in R^S$: 圧力の制御目標値。

このように、配水制御の問題は、管路網方程式(1)と観測方程式(2)から制御指標の(3)式を最小にする操作量を決めることと定式化される。この制御問題に対して需要量の変化の緩やかさを考慮すれば、需要量を一定としてもさしつかえなく、それにより、つぎのように線形制御方策が導ける。

$$u(k+1) = u(k) + \frac{\partial H}{\partial u} (u(k))^+ (Z_0 - H(u(k))) \quad (4)$$

ここで、(1)式において、需要量 u_D を一定とすれば流量 x_C は、操作量 u_V の関数になり、計測系(2)式も u_V の関数とな

ることからこの関数を $Z = H(u_V(k))$ と表わしたものである。また、 $\frac{\partial H}{\partial u} (u(k))^+ = - \left(\frac{\partial H}{\partial u} (u(k))^T \frac{\partial H}{\partial u} (u(k)) \right)^{-1} \frac{\partial H}{\partial u} (u(k))$ 。

2.2 分割に対する基本的検討

分散制御を実現するには、どのように分割するかが問題である。分割として、情報構造の違いから重複分散制御、完全分散制御、及び集中制御を対応させて、収束性に関して比較評価する。

対象となる配水系統をつぎのような構造を持つものとして表現する。

$$Z = H(u_1, u_2)$$

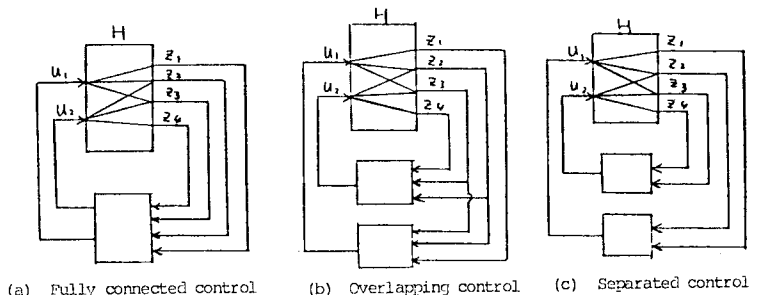


Fig. 1 Schemes of control

$$z_1=h_1(u_1), z_2=h_2(u_1, u_2), z_3=h_3(u_1, u_2), z_4=h_4(u_2) \quad (7)$$

制御の目標値を Z_0 とすれば、一般に線形制御方策はつぎのように表現できる。

$$u(k+1)=u(k)+Q(u(k))(Z_0-H(u(k))) \quad (8)$$

まず、集中制御であるが、Fig.1(a)のように一制御器で制御すると制御則は(6)式と同一である。収束性を調べれば、最適点 $Z_0=H(u^*)$ 近傍の収束性が次のように書ける。これは、次数2で u^* に収束すると言える。

$$\left| u(k+1)-u^* \right| \leq \left| C \right| \left| u^*-u(k) \right|^2 \quad (9)$$

つぎに、重複分散制御であるが、Fig.1(b)のような構造の制御系全体の制御則は次式になる。

$$u(k+1)-u(k)=-\left(\frac{\partial H^T}{\partial u} \frac{\partial H}{\partial u} - \begin{pmatrix} 0 & \sum_{i=2}^3 \frac{\partial h_i}{\partial u_1} \frac{\partial h_i}{\partial u_2} \\ \sum_{i=2}^3 \frac{\partial h_i}{\partial u_1} \frac{\partial h_i}{\partial u_2} & 0 \end{pmatrix} \right)^{-1} \frac{\partial H^T}{\partial u} (Z_0-H(u(k))) \quad (10)$$

$$\text{ここで、} \quad \frac{\partial H^T}{\partial u} = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial u_1} & \frac{\partial h_2}{\partial u_1} & \frac{\partial h_3}{\partial u_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial h_2}{\partial u_2} & \frac{\partial h_3}{\partial u_2} & \frac{\partial h_4}{\partial u_2} \end{pmatrix}$$

操作量 u_1, u_2 が制御量 z_2, z_3 に弱連結であるとする次の仮定を置くと、

$$\frac{\partial h_2}{\partial u_i}, \frac{\partial h_3}{\partial u_i} \sim 0(\epsilon) \quad i=1,2 \quad (11)$$

(10)式から重複分散制御の収束性はつぎのように表わせる。

$$\left| u(k+1)-u^* \right| \leq \left\{ \left| A^{-1} \delta A_P(\epsilon^2) \right| + O(\epsilon^4) \frac{\partial H}{\partial u} \right\} \left| u^*-u(k) \right| + \left| C \right| \left| u^*-u(k) \right|^2 \quad (12)$$

$$\text{ここで、} \quad A = \left(\frac{\partial H^T}{\partial u_1} \cdot \frac{\partial H}{\partial u_2} \right), \quad \delta A_P(\epsilon^2) = \begin{pmatrix} 0 & \sum_{i=2}^3 \frac{\partial h_i}{\partial u_1} \frac{\partial h_i}{\partial u_2} \\ \sum_{i=2}^3 \frac{\partial h_i}{\partial u_1} \frac{\partial h_i}{\partial u_2} & 0 \end{pmatrix}$$

さらに、完全分散制御(Fig.1(c))の収束性はつぎのように表わせる。

$$\left| u(k+1)-u^* \right| \leq \left\{ \left| A^{-1} \delta A_S(\epsilon^2) \right| + \left| A^{-1} \delta B(\epsilon) \frac{\partial H^T}{\partial u} \right| + O(\epsilon^3) \frac{\partial H}{\partial u} \right\} \left| u(k)-u^* \right| + \left| C \right| \left| u^*-u(k) \right|^2 \quad (13)$$

$$\text{ここで、} \quad \delta A_S(\epsilon^2) = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_3^2}{\partial u_1} & \sum_{i=2}^3 \frac{\partial h_i}{\partial u_1} \frac{\partial h_i}{\partial u_2} \\ \sum_{i=2}^3 \frac{\partial h_i}{\partial u_1} \frac{\partial h_i}{\partial u_2} & \frac{\partial h_2^2}{\partial u_2} \end{pmatrix}, \quad \delta B(\epsilon) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial u_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial h_2}{\partial u_2} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(9)式、(12)式、(13)式の収束性を比べると次のように比較評価できる。

$$\text{集中制御} \} \text{重複分散制御} \} \text{完全分散制御} \quad (14)$$

集中制御が最もよい収束性を示しているが、制御器にはおのずと処理能力限界があり、全システムを扱えない可能性が高い。これに対し、複数個の制御器による重複分散制御は、全体を扱え、収束性の点からも有効である。

3. 管網適応制御の方策

3.1 適応制御器の制御モデル

重複分散したサブシステムごとに制御器を置くという重複分散制御は、収束性の点から有効であることは、前節で示した。しかし、これは需要が一定の場合についてである。実際には需要がゆっくり変化するので、そのときの各制御器が持つべきモデルについて記述する。全体の線形モデルを二つのサブシステムに重複分割すればつぎのように書ける。

$$S_1 : \begin{bmatrix} \Delta Z_1 \\ \Delta Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{21} \end{bmatrix} \Delta u_1 + c_1 \quad S_2 : \begin{bmatrix} \Delta Z_2 \\ \Delta Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} \\ H_{32} \end{bmatrix} \Delta u_2 + c_2 \quad (15)$$

ここで、 H_{ij} は $\frac{\partial H}{\partial u}(u(k))$ の部分行列、 $H_{12} \approx 0$, $H_{31} \approx 0$, $H_{21} \sim O(\epsilon)$, $H_{22} \sim O(\epsilon)$ となるよう置換したものである。また、 c_1, c_2 は、 S_1 では Δu_2 の情報が、 S_2 では Δu_1 の情報が得られないので、自己の受け持つ操作量では説明のつかない変数としてまとめたものである。この時、各制御器が持つべき一般的制御モデルは、

$$S_i : \Delta Z_i(k+1) = H_i \Delta u_i(k) + c_i \quad (16)$$

と表わせる。この式を基礎に、パラメータを推定し、制御する適応制御方策を導く。

3.2 管網適応制御方策

まず、適応制御則を構成するもののうち、未知のパラメータである感度係数 H_i と c_i をプロセスの入出力から推定する部分について示す。推定の指標として実測値と推定値との差が最小となるように、二乗誤差の評価関数を次のように置く。

$$J_i(k) = \sum_{j=1}^k \lambda_i^{k-j} \left(\Delta \tilde{Z}_i(j) - \hat{\Delta Z}_i(j) \right)^T \left(\Delta \tilde{Z}_i(j) - \hat{\Delta Z}_i(j) \right) \quad (17)$$

上式に最小二乗法を適用し、実時間推定のために逐次形にすれば、次の推定式が導出できる。

$$\hat{\Theta}_i(k+1) = \hat{\Theta}_i(k) + \frac{1}{\Delta_i(k)} \left\{ \Delta \tilde{Z}_i(k+1) - \hat{\Theta}_i(k) \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta u_i(k) \end{bmatrix} \right\} \left\{ \frac{F_i(k)}{\lambda_i} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta u_i(k) \end{bmatrix} \right\} \quad (18)$$

$$F_i(k+1) = F_i(k) - \frac{1}{\Delta_i(k)} \left(\frac{F_i(k)}{\lambda_i} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta u_i(k) \end{bmatrix} \right) \left(\frac{F_i(k)}{\lambda_i} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta u_i(k) \end{bmatrix} \right)^T, \quad \Delta_i(k) = 1 + \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta u_i(k) \end{bmatrix} \frac{F_i(k)}{\lambda_i} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta u_i(k) \end{bmatrix} \quad (19)$$

ここで、 $\hat{\Theta}_i(k+1) = [\hat{c}_i(k+1) \quad \hat{H}_i(k+1)]$

つぎに、制御部分にあたる制御則を示す。分離したサブシステム i の制御指標を次のように置く。

$$I_i = (\tilde{Z}_i(k+1) - Z_{0i})^T P_i (\tilde{Z}_i(k+1) - Z_{0i}) + (u_i(k+1) - u_i(k))^T Q_i (u_i(k+1) - u_i(k)) \rightarrow \min \quad (20)$$

ここで、 P_i, Q_i は正定。 I_i が最小となる操作量は、前記推定値を用いてつぎのように得られる。

$$u_i(k+1) = \hat{G}_i(k+1) (Z_{0i} - \tilde{Z}_i(k+1) - \hat{c}_i(k+1)) + u_i(k) \quad (21)$$

ここで、

$$\hat{G}_i(k+1) = (\hat{H}_i(k+1) P_i \hat{H}_i(k+1) + Q_i)^{-1} \hat{H}_i(k+1) P_i \quad (22)$$

(21)式が制御部の制御則であり、 $\hat{G}_i(k+1)$ が制御ゲインになる。以上が適応制御器の制御方策である。

4. 配水系統への適用

4.1 具体的な分割法

提案した制御方式の検証をする前に、どのように重割分割するかを具体的に示す。対象とする管路網は、配水基池6ヶ所、バルブ設置点8ヶ所、圧力観測点35ヶ所、節点数142点、管路数205本であり、Fig.2のように配置されているものとする。重複分割の構造をきめることは、各制御器の受け持つ守備範囲を決めることであり、集中制御の感度行列

$\frac{\partial H}{\partial u}$ を基に決定する。感度行列は需要の大きさに応じて変化するが、需要レベルの異なる感度行列を作成してみるとその形状が類似している。これより、感度行列の平均をとった行列を、重複分割化のための感度行列 H^* とする。制御器間の操作量による干渉を大きくしないため、連結の強さが似た構造のものは1つの制御器にまとめて受け持たせる。例えば、Fig.3の(a)に示すように、バルブ1,2,7は観測点との連結構造が似ており、地理的位置も近いのでこれら

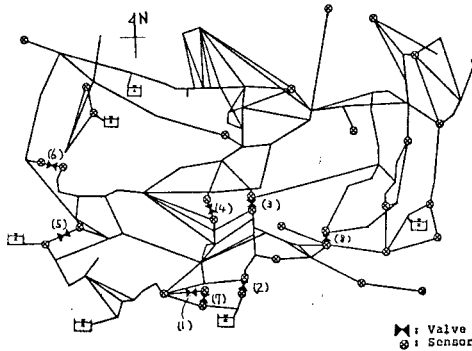


Fig. 2 Large scale water distribution network

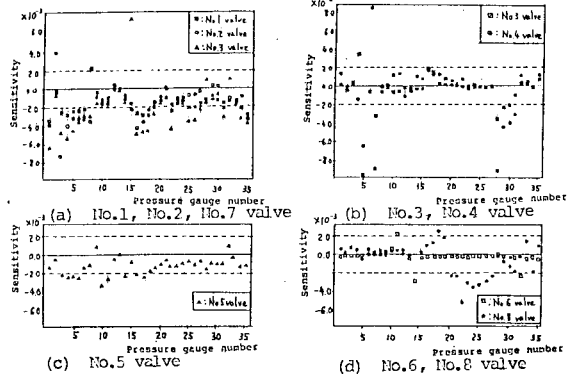


Fig. 3 Sensitivity of controlled variables to manipulated variable

のバルブを1つの制御器が受け持つことにする。一方、各制御器の守備範囲は、制御器が受け持つバルブ操作に対して比較的強い連結関係にある観測点であり、その境界をFig.3に示した。このように、重複分散制御系の情報構造を決定し図にしたのがFig.4である。また、完全分散制御系との比較のため、Fig.5に示すように、ある観測点情報はある1つの制御器への入力となるよう完全分割を決めた。

4.2 適用実験例

夜間需要時に、全てのバルブを全開したときの無制御状態を示したのがFig.6である。重複分散制御を適用した場合はFig.7に示すように、50mAg以上の高圧地域が縮小し、適正圧になる。完全分散制御を適用すれば、Fig.8のように、50mAg以上の高圧地域が重複分割制御の場合より広がってしまい、制御性が劣る。また、信頼性確保の検証を行うため、Fig.4の構成において、C制御器をダウンさせた場合について調べる。ダウン時の分布Fig.9はダウンしないときより東側に高圧地域が増加するが、部分ダウンが全体に波及せず、正常機能している制御器で信頼性が確保されている。

5. おわりに

大規模配水システムを重複分割し、分割したサブシステムごとに適応制御器を置くという重複分散適応方式の提案を行った。これを実現するために、

どのように分割すればよいかという分割化の方法として重複分割を示し、適応制御器として管網適応制御方策を考案し、その有効性を大規模配水システムのシミュレーションで確認した。さらに分散制御の特徴である信頼性の確保についてもその有効性を示した。

6. 参考文献

1) 瀬古沢ら

: 区分線形化法による配水管網のフィードバック制御、計測自動制御学会論文集18-8('82)

2) 宮岡ら

: ネットワークフロー理論の応用による大規模配水システムの圧力最適化、電学論C、102-3('82)

3) M. Ikedaら

: On Decentralized Control with Overlapping Information Sets, The 8th IFAC Congress('81)

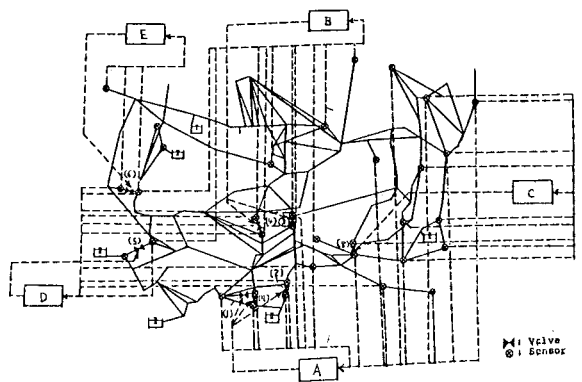


Fig. 4 Control configuration using partially shared observation data

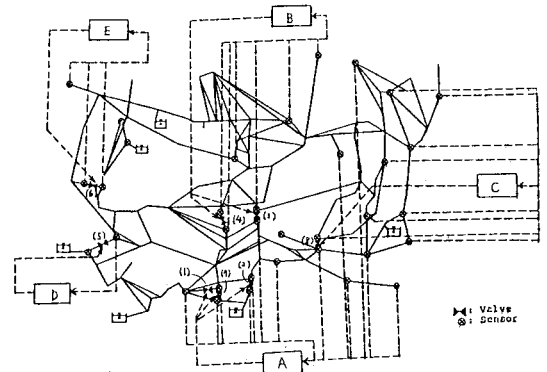


Fig. 5 Control configuration using no shared observation data

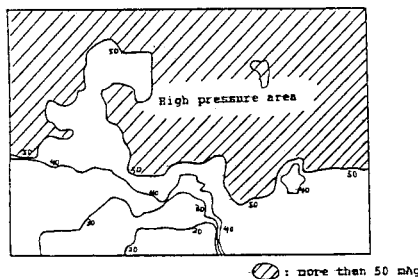


Fig. 6 Service pressure distribution of no control

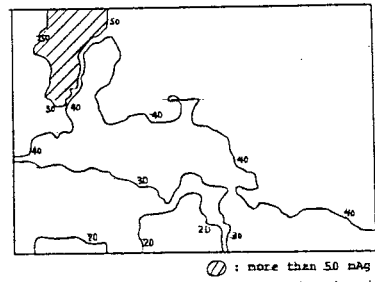


Fig. 7 Service pressure distribution by overlapping control

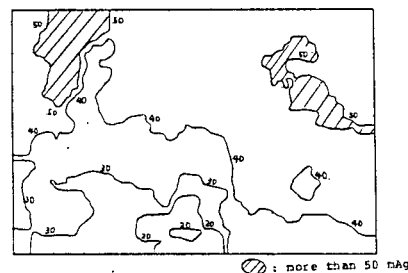


Fig. 8 Service pressure distribution by separated control

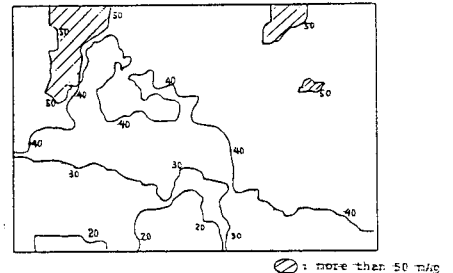


Fig. 9 Service pressure distribution by overlapping control in the case of failure of C controller