

正員 中部電力 K. K. 大野定利

1. まえがき 従来サージタンクの設計に当っては、数値計算の繁雑さの理由から全負荷急遮断および一定負荷の急増についてのサージング高の検討および  $T_{\text{No. } m}$  の安定条件による安定性の検討がなされる程度であつた。

しかしながら、発電機の運転方法は単純ではなく、また水力開発地奥の枯渇から、より経済設計を要求されるようになったため複雑なサージタンクが考えられるようになった。更に電力の安定供給、負の向上の目的から、近年 A.F.C. 運転の発電所が増大し、サージタンクの設計についてもこれらの要求を満たすべく、多方面に亘る検討が必要となり、各方面でこれらの研究がなされている。<sup>\*注</sup>

このため当社では、数値計算を簡単に行い、多方面からの検討を容易に行うための一方法として、アナログ計算機による数値計算を多く採用しているため、これについて紹介し、更に計算結果得られた運転規制の一例を示す。

2. 一般的なサージタンク水理系のアナログ計算 複雑なサージタンク水理系の一例として、途中に溪流取水に伴う補助制水口サージタンクを有し、また作業用斜坑を将来の保守点検用に残し、補助サージタンクの働きを期待する水理系を考え、主タンクとしては減衰性のよい差動型サージタンクを有する場合、すなわち図-1の如き水理系を考へる。

図示の如く記号を用い、それぞれ矢印方向を  $\oplus$  とすれば、流水の運動方程式および連続方程式は下記のようにあらわされる。

貯水池 ~ No.1 補助差動タンク間

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_1}{g f_1} \cdot \frac{dQ_1}{dt} + \frac{\alpha_1}{f_1^2} Q_1 |Q_1| &= -H_{S1} \\ Q_1 &= Q_2 + Q_{S1} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

ここに  $\alpha_1$ : 導水路損失係数

No.1 補助差動タンク ~ No.2 補助タンク間

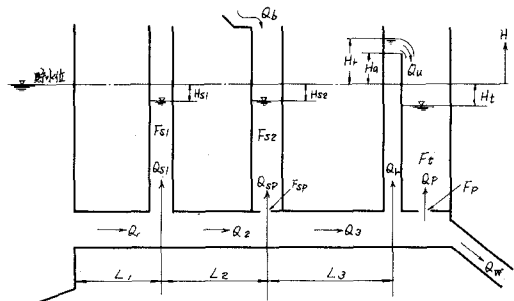
$$\left. \begin{aligned} \frac{L_2}{g f_2} \cdot \frac{dQ_2}{dt} + \frac{\alpha_2}{f_2^2} Q_2 |Q_2| &= -H_{S2} - H_B + H_{S1} \\ Q_2 &= Q_3 + Q_{S2} \\ H_B &= \frac{1}{2g C_{Sp} F_{Sp}^2} \cdot Q_{Sp} |Q_{Sp}| = \frac{\beta}{f_{Sp}^2} Q_{Sp} |Q_{Sp}| \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここに  $\beta$ : 制水口損失係数  $= \frac{1}{2g C_{Sp}^2}$

No.2 補助制水口タンク ~ 主タンク間

$$\frac{L_3}{g f_3} \cdot \frac{dQ_3}{dt} + \frac{\alpha_3}{f_3^2} Q_3 |Q_3| = -H_r + H_B + H_{S2}$$

図-1 導水路複式サージタンク水理系  
(単衝 - 制水口(溪流取水) - 差動)



$$\left. \begin{aligned} Q_3 &= Q_w + Q_r + Q_p \\ Q_p &= \pm C_p F_p \sqrt{2g} |H_r - H_t|^{\frac{1}{2}} = \pm \gamma |H_r - H_t|^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \text{----- (3)}$$

ここに  $C_p$ : 制水口流量係数  $\gamma = C_p F_p \sqrt{2g}$

一方サージタンク内の水流の連続条件から、

$$\left. \begin{aligned} F_{s1} \frac{dH_{s1}}{dt} &= Q_{s1}, \quad F_{s2} \frac{dH_{s2}}{dt} = Q_{sp} + Q_b, \quad F_r \frac{dH_r}{dt} = Q_r - Q_u, \quad F_t \frac{dH_t}{dt} = Q_p + Q_u \\ Q_u &= \pm C B (H_r - H_a)^{\frac{3}{2}} = \pm m |H_r - H_a|^{\frac{3}{2}} \text{----- 完全越流} \\ Q_u &= \pm C B |H_r - H_t|^{\frac{3}{2}} = \pm m |H_r - H_t|^{\frac{3}{2}} \text{----- 不完全越流} \end{aligned} \right\} \text{----- (4)}$$

ここに  $C$ : 越流係数,  $B$ : ライザー越流長,  $m = C B$

式(1)~(4)について初期定常状態の値に添字 $i$ を、初期値からの変化分に $\Delta$ を付せば、

$$\left. \begin{aligned} -H_{s1i} &= \frac{\alpha_1}{f_1^2} Q_{1i} |Q_{1i}|, \quad -H_{s2i} = \frac{\alpha_2}{f_2^2} Q_{2i} |Q_{2i}| + \frac{\beta}{F_{sp}^2} (-Q_{bi}) |Q_{bi}| + \frac{\alpha_1}{f_1^2} Q_{1i} |Q_{1i}| \\ -H_{ri} &= -H_{ti} = \frac{\alpha_3}{f_3^2} Q_{3i} |Q_{3i}| + \frac{\alpha_2}{f_2^2} Q_{2i} |Q_{2i}| + \frac{\alpha_1}{f_1^2} Q_{1i} |Q_{1i}| \\ Q_{s1i} &= Q_{ri} = Q_{pi} = Q_{ui} = 0, \quad Q_{s2i} = -Q_{bi}, \quad Q_{1i} = Q_{2i} \\ Q_{2i} &= Q_{3i} - Q_{bi} = Q_{wi} - Q_{bi}, \quad Q_{3i} = Q_{2i} + Q_{bi} = Q_{wi} \end{aligned} \right\} \text{----- (5)}$$

式(5)の關係となり、これを式(1)~(4)に代入すれば、

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_1}{g f_1} \cdot \frac{d(\Delta Q_1)}{dt} + \frac{\alpha_1}{f_1^2} \left\{ (Q_{1i} + \Delta Q_1) |Q_{1i} + \Delta Q_1| - Q_{1i} |Q_{1i}| \right\} &= -\Delta H_{s1} \\ \frac{L_2}{g f_2} \cdot \frac{d(\Delta Q_2)}{dt} + \frac{\alpha_2}{f_2^2} \left\{ (Q_{2i} + \Delta Q_2) |Q_{2i} + \Delta Q_2| - Q_{2i} |Q_{2i}| \right\} \\ &+ \frac{\beta}{F_{sp}^2} \left\{ (-Q_{bi} + \Delta Q_{sp}) | -Q_{bi} + \Delta Q_{sp} | - (-Q_{bi}) |Q_{bi}| \right\} = -(\Delta H_{s2} - \Delta H_{s1}) \\ \frac{L_3}{g f_3} \cdot \frac{d(\Delta Q_3)}{dt} + \frac{\alpha_3}{f_3^2} \left\{ (Q_{3i} + \Delta Q_3) |Q_{3i} + \Delta Q_3| - Q_{3i} |Q_{3i}| \right\} \\ &- \frac{\beta}{F_{sp}^2} \left\{ (-Q_{bi} + \Delta Q_{sp}) | -Q_{bi} + \Delta Q_{sp} | - (-Q_{bi}) |Q_{bi}| \right\} = -(\Delta H_r - \Delta H_{s2}) \end{aligned} \right\} \text{----- (6)}$$

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_{s1} + \Delta Q_2$$

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_{s2} + \Delta Q_3$$

$$\Delta Q_3 = \Delta Q_r + \Delta Q_w + Q_p$$

$$F_{s1} \frac{d(\Delta H_{s1})}{dt} = \Delta Q_{s1}, \quad F_{s2} \frac{d(\Delta H_{s2})}{dt} = \Delta Q_{s2} + \Delta Q_b, \quad F_r \frac{d(\Delta H_r)}{dt} = \Delta Q_r - \Delta Q_u$$

$$F_t \frac{d(\Delta H_t)}{dt} = \Delta Q_p + \Delta Q_u, \quad \Delta Q_p = \pm \gamma |\Delta H_r - \Delta H_t|^{\frac{1}{2}}$$

$$\Delta Q_u = \pm m |\Delta H_r - H_{ai}|^{\frac{3}{2}} \text{----- 完全越流} \quad \pm m |\Delta H_r - \Delta H_t|^{\frac{3}{2}} \text{----- 不完全越流}$$

$$\text{ただし } H_{ai} = H_a - H_{ri} = H_a - H_{ti}$$

となり、流量の基準値を  $Q_0$ 、水位の基準値を  $H_0$ ,  $H_{uc}$  とし、変化量/基準値、初期値/基準値も、小文字で書きあらわせば、式(6)は

$$\begin{aligned} T_{v1} \frac{d\delta_1}{dt} + K_{\alpha 1} \{ (\delta_{1i} + \delta_1) | \delta_{1i} + \delta_1 | - \delta_{1i} | \delta_{1i} | \} &= -h_{s1} \\ T_{v2} \frac{d\delta_2}{dt} + K_{\alpha 2} \{ (\delta_{2i} + \delta_2) | \delta_{2i} + \delta_2 | - \delta_{2i} | \delta_{2i} | \} \\ &+ K_{\beta} \{ (-\delta_{bi} + \delta_{sp}) | -\delta_{bi} + \delta_{sp} | - (-\delta_{bi}) | \delta_{bi} | \} = - (h_{s2} - h_{s1}) \\ T_{v3} \frac{d\delta_3}{dt} + K_{\alpha 3} \{ (\delta_{3i} + \delta_3) | \delta_{3i} + \delta_3 | - \delta_{3i} | \delta_{3i} | \} \\ &- K_{\beta} \{ (-\delta_{bi} + \delta_{sp}) | -\delta_{bi} + \delta_{sp} | - (-\delta_{bi}) | \delta_{bi} | \} = - (h_r - h_{s2}) \end{aligned} \quad \dots (7)$$

$$\delta_1 = \delta_{s1} + \delta_2 \quad \delta_2 = \delta_{s2} + \delta_3 \quad \delta_3 = \delta_p + \delta_r + \delta_w$$

$$T_{s1} \frac{dh_{s1}}{dt} = \delta_{s1}, \quad T_{s2} \frac{dh_{s2}}{dt} = \delta_{s2} + \delta_b, \quad T_r \frac{dh_r}{dt} = \delta_r - \delta_u, \quad T_t \frac{dh_t}{dt} = \delta_p + \delta_u$$

$$\delta_p = \pm K_p |h_r - h_t|^{\frac{1}{2}} \quad H_r > H_t \text{ のとき } \oplus$$

$$\begin{aligned} \delta_u = & \begin{cases} K_u |h_r - h_{ai}|^{\frac{3}{2}} & H_r > H_a, H_t < H_a \\ -K_u |h_t - h_{ai}|^{\frac{3}{2}} & H_t > H_a, H_r < H_a \end{cases} \text{完全越流} \\ & \begin{cases} K_u |h_r - h_t|^{\frac{3}{2}} & H_r > H_t, H_t > H_a \\ -K_u |h_t - h_r|^{\frac{3}{2}} & H_t > H_r, H_r > H_a \end{cases} \text{不完全越流} \\ & 0 \quad H_t < H_a, H_r < H_a \end{aligned}$$

$$\text{但し } T_{v1} = \frac{L_1}{g f_1} \cdot \frac{Q_0}{H_0}, \quad T_{v2} = \frac{L_2}{g f_2} \cdot \frac{Q_0}{H_0}, \quad T_{v3} = \frac{L_3}{g f_3} \cdot \frac{Q_0}{H_0}, \quad T_{s1} = F_{s1} \frac{H_0}{Q_0}, \quad T_{s2} = F_{s2} \frac{H_0}{Q_0}$$

$$T_r = F_r \frac{H_0}{Q_0}, \quad T_t = F_t \frac{H_0}{Q_0}, \quad K_{\alpha 1} = \frac{\alpha_1}{f_1^2} \cdot \frac{Q_0^2}{H_0}, \quad K_{\alpha 2} = \frac{\alpha_2}{f_2^2} \cdot \frac{Q_0^2}{H_0}, \quad K_{\alpha 3} = \frac{\alpha_3}{f_3^2} \cdot \frac{Q_0^2}{H_0}$$

$$K_{\beta} = \frac{\beta}{F_{sp}} \cdot \frac{Q_0^2}{H_0}, \quad K_p = \gamma \frac{H_0^{\frac{1}{2}}}{Q_0}, \quad K_u = m \frac{H_{uo}^{\frac{3}{2}}}{Q_0}, \quad h_{ai} = \frac{H_a - H_{ri}}{H_0}$$

となる。(6)式をラプラス変換し、伝達関数ならびに伝達要素を求め、ブロック線図によりあらわせば、図-2の通りとなり、アナログ計算機の各演算要素をブロック線図により組合わせて計算する。

この場合、粗度係数、ポートの流量係数等は各種変化させて安全側をとらねばならないが、 $K_{\beta}$ ,  $K_{\alpha}$ 等のゲインを変えれば簡単に計算出来るし、入力水車流量の変化が  $\delta_w$  を変化させることにより、負荷急遮断、負荷急増はもとより、負荷漸増、負荷遮断後急増あるいは、正弦流量変化等、各要求運転条件に従って容易に計算しうる。

### 3. 運転規制の一例

当社で建設中の地下発電所で放水路に作業用斜坑を利用した単働サージタンクを有する水理系について、必要な運転規制を設計に折込み、経済的なサージタンクのあり方について検討を行った一例を

のべる。

本放水路は常時閉水路として働き、洪水時河川水位が上昇して放水路出口天端を越える場合、圧カトンネルとなり、サージタンクが有効となる。

この場合まづ、河川の出水量状況の過去のデータから各年洪水量を推定し、この洪水量に対する放水路出口河川水位を過去の実績、あるいは計算によって関係づけける。

次に各年洪水量に応じた放水路出口水位に対して、それぞれ前述のアナログ計算機を利用した計算方法によって、各トンネル所要強度（負荷遮断について計算）および運転規制を設ける。

最後に各年洪水量に応じた所要強度に対する工事費と運転規制による年間損失電力料および規制のための工事費を計算し、工事費と損失電力料との比較によって経済的に有利な方法をとる。

この様にして比較検討を行った結果、設けた運転規制について、各水車使用水量（1/2負荷以下に対しては計算省略）に応ずる規制放水路出口水位およびガバナの規制状態を、図-3の如く定めた。

なお、サージタンクの安定性の検討に関しては、サージタンクが $7.0\text{ m}$ の条件に満たない断面積のため、電研水路水理研究室、是枝室長に依頼して、ガバナー、ガイドバーン等水力機器の動作を考慮し、水車起動時および併列運転時について、アナログ計算を行って、その安定性を確かめたので付記する。

※是枝 氏：複雑なサージタンク系を有する電機的水力C特性解析に就いて 電気学雑誌  
※是枝 氏：煙草工 発電所サージタンクの水位変動特性と AFC 運転に関する水理学的検討 電気学雑誌

図-2 導水路模式デジタルブロック線図

(単衝-制水口(頂流取水)-差動)

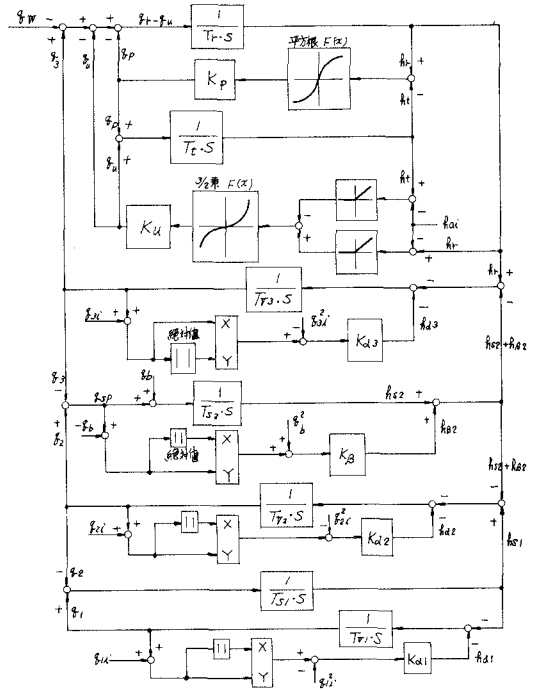


図-3 放水路出口水位と水車使用水量による運転規制

