

ЭНЕРГЕТИКА

Н. А. Картвелишвили

Устойчивость регулирования гидравлических и паровых турбин при их параллельной работе

Рассмотрим переходный режим теплофикационной турбины с двумя отборами пара.

Уравнения работы турбины при малых нарушениях равновесного состояния напишутся так:

$$m = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + b_{11}\varphi + b_{12}\pi_2 + b_{13}\pi_3, \quad (1)$$

$$T''_v \frac{d\pi_2}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + b_{21}\varphi + b_{22}\pi_2 + b_{23}\pi_3 - g_2, \quad (2)$$

$$T''_v \frac{d\pi_3}{dt} = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + b_{31}\varphi + b_{32}\pi_2 + b_{33}\pi_3 - g_3, \quad (3)$$

В этих уравнениях:

m —увеличение механического момента турбины в долях от некоторого номинального момента,

g_2 —увеличение расхода пара в отборе высокого давления в долях от некоторого номинального расхода,

g_3 —то же в отборе низкого давления,

φ —увеличение числа оборотов турбины в долях от номинального числа оборотов,

π_2 —увеличение давления пара в камере отбора высокого давления в долях от номинального давления,

π_3 —то же, в камере отбора низкого давления,

x_1, x_2, x_3 —относительные смещения поршней сервомоторов клапанов первой, второй и третьей ступени,

t —время.

T''_v и T'''_v —постоянные времени камер отбора,

a_{ik} и b_{ik} —постоянные коэффициенты, зависящие от параметров и характеристик турбины.

Будем считать, что система регулирования турбины осуществляется без перекрестных связей, с упругим выключением каждого золотника. Тогда уравнения регулирования будут иметь вид:

$$T_{11} \frac{dx_1}{dt} + s_{11}\varphi + s_{12}\pi_2 + s_{13}\pi_3 + y_1 = 0, \quad (4)$$

$$T_{ci} \frac{dy_i}{dt} + y_i - T_{si} \frac{dx_i}{dt} - \mu_i x_i = 0, \quad (5)$$

($i = 1, 2, 3$). Здесь:

y_i — смещение обратной связи 1-го золотника,

T_{si} — постоянная времени 1-го сервомотора,

T_{ci} — постоянная времени выключения 1-го золотника,

μ_i — коэффициент, зависящий от остаточной неравномерности регулирования,

s_{ik} — постоянные, зависящие от характеристик измерительных элементов регулятора и от их передаточных чисел на золотники.

Из уравнений (4) и (5)

$$X_i = -L_i(p)(s_{i1}\Phi + s_{i2}\Pi'' + s_{i3}\Pi'''), \quad (6)$$

где: $X_i \rightarrow x_i$, $\Phi \rightarrow \varphi$, $\Pi'' \rightarrow \pi_2$, $\Pi''' \rightarrow \pi_3$,

P — оператор Хевисайда, и

$$L_i(p) = \frac{T_{ci}p + 1}{T_{si}T_{ci}p^2 + (T_{si} + T_{ci})p + \mu_i} \quad (7)$$

Исключая x_1 , x_2 , x_3 из уравнений (1), (2) и (3) с помощью выражения (6), получим операторные уравнения теплофикационной турбины:

$$m \leftarrow [b_{11} - R_{11}(p)]\Phi + [b_{12} - R_{12}(p)]\Pi'' + [b_{13} - R_{13}(p)]\Pi''', \quad (8)$$

$$g \leftarrow [b_{21} - R_{21}(p)]\Phi + [b_{22} - T''_v p - R_{22}(p)]\Pi'' + [b_{23} - R_{23}(p)]\Pi''', \quad (9)$$

$$g_3 \leftarrow [b_{31} - R_{31}(p)]\Phi + [b_{32} - R_{32}(p)]\Pi'' + [b_{33} - T'''_v p - R_{33}(p)]\Pi''', \quad (10)$$

где

$$R_{ik}(p) = \sum_{r=1}^3 a_{ir} s_{rk} L_r(p) \quad (11)$$

Задача об устойчивости регулирования при параллельной работе теплофикационных и гидравлических турбин в общем виде не встречает принципиальных затруднений. Но такое общее решение отличается исключительной громоздкостью, препятствующей его практическому использованию. Мы ограничимся здесь частным случаем, имеющим, повидимому, наибольшее практическое значение, а именно, случаем, когда параметры регуляторов теплофикационных турбин удовлетворяют условиям автономности регулирования. Ход решения задачи в общем случае не отличается от хода решения ее в этом частном случае, но результаты получаются гораздо более сложными.

Если условия автономности регулирования удовлетворены, то:

$$T_{s1} = T_{s2} = T_{s3}, T_{c1} = T_{c2} = T_{c3}, \mu_1 = \mu_2 = \mu_3, \sum_{r=1}^3 a_{ir} s_{rk} = 0 \quad (i \neq k)$$

и поэтому

$$L_1(p) = L_2(p) = L_3(p), \quad R_{ik}(p) = 0 \quad (i \neq k), \\ R_{11}(p) = \beta' L(p), \quad R_{22}(p) = \beta'' L(p), \quad R_{33}(p) = \beta''' L(p),$$

где

$$\beta' = \sum_{r=1}^3 a_{1r} s_{r1}, \quad \beta'' = \sum_{r=1}^3 a_{2r} s_{r2}, \quad \beta''' = \sum_{r=1}^3 a_{3r} s_{r3}, \quad (12)$$

$$L(p) = \frac{T_c p + 1}{T_s T_c p^2 + (T_s + T_c) p + \mu}, \quad (13)$$

причем численные индексы при L , T_s , T_c , μ , за ненадобностью, опущены. Теперь уравнения (8), (9) и (10) приобретают вид:

$$m \leftarrow [b_{11} - \beta' L(p)] \Phi + b_{12} \Pi'' + b_{13} \Pi''' \quad (14)$$

$$g_2 \leftarrow b_{21} \Phi + [b_{22} - T'' p - \beta'' L(p)] \Pi'' + b_{23} \Pi''' \quad (15)$$

$$g_3 \leftarrow b_{31} \Phi + b_{32} \Pi'' + [b_{33} - T''' p - \beta''' L(p)] \Pi''' \quad (16)$$

Рассмотрим теплоэлектроцентраль, объединяющую n турбин. Будем считать, что все эти турбины работают параллельно как на электрическую сеть, так и на тепловые сети высокого и низкого давления. Полагая электрические связи жесткими, нужно считать значения Φ одинаковыми для всех турбин. Пренебрегая потерями в паропроводах и инерцией пара, нужно считать также одинаковыми давления пара в камерах отбора высокого давления всех турбин и давления пара в камерах отбора низкого давления всех турбин. Таким образом, значения π_2 , так же как и π_3 , для всех турбин одинаковы. Изменения механических моментов турбин будем относить к сумме номинальных моментов всех агрегатов энергетической системы, в которой работает данная станция, а изменения отбираемых расходов пара — к номинальным расходам пара соответствующих сетей.

Просуммировав уравнения (14) всех турбин данной станции и учитывая сделанные замечания, получим:

$$M \leftarrow [B_{11} - \sum_{i=1}^n \beta'_i L_i(p)] \Phi + B_{12} \Pi'' + B_{13} \Pi''', \quad (17)$$

а проделав аналогичную операцию с уравнениями (15) и (16), будем иметь:

$$G'' \leftarrow B_{21} \Phi + [B_{22} - T'' p - \sum_{i=1}^n \beta''_i L_i(p)] \Pi'' + B_{23} \Pi''', \quad (18)$$

$$G''' \leftarrow B_{21}\Phi + B_{22}\Pi'' + [B_{22} - T''p - \sum_{i=1}^n \beta_i'' L_i(p)]\Pi''' \quad (19)$$

В уравнениях (17), (18) и 19:

M , G'' , G''' — суммарные изменения механических моментов и расходов пара в отборах высокого и низкого давления всех турбин данной станции;

T'' , T''' — суммы постоянных времени камер отбора T''_v и T'''_v всех турбин,

B_{ik} — сумма коэффициентов b_{ik} всех турбин.

Заметим, что индекс при L в уравнениях (17), (18) и (19) обозначает номер турбины, т. е. имеет совершенно иной смысл, чем в выражениях (7) и (11), где он обозначал номер измерителя регулятора.

Сохранив обозначения G'' и G''' не только за величинами G'' и G''' , но и за их операторными изображениями, заменим в уравнениях (18) и (19) знак $\leftarrow$ знаком равенства и решим их относительно Π'' и Π''' , что даст:

$$\Pi'' = \frac{1}{D(p)} \left\{ G'' [B_{22} - T''p - \sum_{i=1}^n \beta_i'' L_i(p)] - G''' B_{22} - [B_{22} B_{21} - B_{21} B_{22} - B_{21} T'''p - B_{22} \sum_{i=1}^n \beta_i''' L_i(p)] \Phi \right\}, \quad (20)$$

$$\Pi''' = \frac{1}{D(p)} \left\{ G''' [B_{22} - T'''p - \sum_{i=1}^n \beta_i''' L_i(p)] - G'' B_{22} - [B_{22} B_{21} - B_{21} B_{22} - B_{21} T''p - B_{22} \sum_{i=1}^n \beta_i'' L_i(p)] \Phi \right\}, \quad (21)$$

где

$$D(p) = [B_{22} - T''p - \sum_{i=1}^n \beta_i'' L_i(p)] [B_{22} - T'''p - \sum_{i=1}^n \beta_i''' L_i(p)] - B_{22} B_{21}. \quad (22)$$

Подставив значения Π'' и Π''' в выражение (15), получим:

$$M \leftarrow [B_{11} - S(p)] \Phi + \frac{1}{D(p)} [G'' U''(p) + G''' U'''(p)], \quad (23)$$

где

$$S(p) = \sum_{i=1}^n \beta_i^1 L_i(p) + \frac{1}{D(p)} [B_{12}(B_{33}B_{21} - B_{31}B_{22}) + B_{13}(B_{22} - B_{21} - B_{32}B_{31}) - \\ - (B_{12}B_{21}T''' + B_{13}B_{31}T'')p - \sum_{i=1}^n B_{12}B_{21}\beta_i''' + B_{13}B_{31}\beta_i''] L_i(p)], \quad (24)$$

$$U''(p) = B_{12}B_{33} - B_{13}B_{32} - B_{12}T'''p - B_{12} \sum_{i=1}^n \beta_i'' L_i(p), \quad (25)$$

$$U'''(p) = B_{13}B_{32} - B_{12} - B_{23} - B_{13}T'''p - B_{13} \sum_{i=1}^n \beta_i'' L_i(p). \quad (26)$$

Перейдем к энергетической системе. Пусть в ее состав входит m теплоэлектростанций и l_1 гидроэлектростанций, приведенных к $l_1 > l_1$ гидрогенераторным агрегатам¹. Паровые конденсационные турбины не имеет смысла выделять в самостоятельную группу, т. к. уравнения переходного режима этих турбин по своей форме являются частным случаем уравнений переходного режима гидротурбин. Поэтому можно считать, что конденсационные турбины входят в число l_1 агрегатов. Теплоэлектростанции будем обозначать номерами $k = +m$, а гидроагрегаты — номерами $k = (m+1) + r$, где $r = m + l_1$.

Как было показано нами¹, операторное изображение изменения механического момента гидротурбины дается следующим выражением:

$$M = \left[b + f \frac{1 - e^{-\gamma p}}{\eta + \varepsilon e^{-\gamma p}} + \left(g - h \frac{1 - e^{-\gamma p}}{\eta + \varepsilon e^{-\gamma p}} \right) L(p) \right] \Phi, \quad (27)$$

в котором $b, f, g, h, \eta, \varepsilon$ — постоянные, зависящие от параметров турбины и напорного трубопровода, γ — длительность фазы гидравлического удара в трубопроводе, $L(p)$ — функция оператора p , зависящая только от параметров регулятора скорости турбины и определяемая выражением, по форме совпадающим с выражением (13).

Электрические связи между всеми генераторами системы будем считать абсолютно жесткими. При этом условии уравнение баланса мощностей в энергетической системе имеет вид:

$$\sum_{k=1}^n M_k = P + \delta\varphi + T_A \frac{d\varphi}{dt}, \quad (28)$$

¹ Н. А. Карвелишвили — Переходные режимы первичных двигателей в энергетических системах. Изв. Тбилисского Н.-И. Ин-та Сооруж. и Гидроэнергетики. Т. III, 1950.

где P — изменение электрической нагрузки системы при номинальной частоте, выраженное в долях суммы номинальных мощностей всех агрегатов системы,

δ — коэффициент, учитывающий зависимость нагрузки от частоты тока,

T_A — постоянная инерции системы.

Из выражений (23), (27) и (28) легко получить:

$$\Phi = -\frac{p}{\Omega(p)} + \frac{1}{\Omega(p)} \sum_{k=1}^m \frac{1}{D_k(p)} [G_k'' U_k''(p) + G_k''' U_k'''(p)], \quad (29)$$

где

$$\Omega(p) = N(p) + \sum_{k=1}^m S_k(p) + \sum_{r=m+1}^r Q_k(p) L_k(p), \quad (30)$$

$$N(p) = \delta - \sum_{k=1}^m B_{11k} + \sum_{r=m+1}^r b_k + T_A p + \sum_{k=m+1}^r \int f_k \frac{1 - e^{-\gamma_k p}}{\eta_k + \varepsilon_k e^{-\gamma_k p}} \quad (31)$$

$$Q_k(p) = g_k - h_k \frac{1 - e^{-\gamma_k p}}{\eta_k + \varepsilon_k e^{-\gamma_k p}}, \quad (32)$$

причем в формуле (29) под P нужно подразумевать операторное изображение величины P , входящей в уравнение (28).

Аналогично тому, как это было сделано в нашей, упомянутой выше, работе, можно показать, что формула (29) приводится к виду

$$\Phi(p) = \frac{\lambda(p)}{\Lambda(p)}, \quad (33)$$

а формулы (20) и (21), после подстановки в них значения Φ из формулы (29) — к виду

$$P_k'' = \frac{\gamma_k''(p)}{\Gamma_k(p)} + \frac{\sigma_k''(p)}{\Lambda(p)}, \quad (34)$$

$$P_k''' = \frac{\gamma_k'''(p)}{\Gamma_k(p)} + \frac{\sigma_k'''(p)}{\Lambda(p)} \quad (35)$$

где $\Lambda(p)$ и $\Gamma_k(p)$ суть целые функции, нули которых совпадают, соответственно, с нулями $\Omega(p)$ и $D_k(p)$, а $\lambda(p)$, $\gamma_k''(p)$, $\sigma_k''(p)$, $\gamma_k'''(p)$ и $\sigma_k'''(p)$ также суть целые функции. Отсюда следует, что регулирование будет устойчиво в том случае, когда все нули функций $D_1(p)$, $D_2(p)$, ..., $D_m(p)$ и $\Omega(p)$ будут иметь отрицательную веществен-

ную часть, т. е. когда справа от мнимой оси на плоскости комплексного переменного p не будет ни одного нуля этих функций.

Обратимся к функциям $D(p)$. Как видно из выражений (22) и (13) полюсами функции $D(p)$ являются нули знаменателей функций $L(p)$. Ограничиваясь случаем отрицательной остаточной неравномерности регулирования (поскольку положительная неравномерность в практике союзных систем не применяется), когда $\mu > 0$, легко усмотреть, что нули знаменателей функций $L(p)$, т. е. полюсы $D(p)$, всегда лежат в левой полуплоскости. Рассмотрим на плоскости p контур W , ограниченный мнимой осью и полуокружностью V бесконечно большого радиуса, опирающийся на мнимую ось, лежащей в правой полуплоскости и имеющей центр в начале координат. Поскольку внутри контура W заведомо нет полюсов функции $D(p)$, то для того, чтобы внутри этого контура не было и нулей $D(p)$, необходимо и достаточно, чтобы изменение $\arg D(p)$ при обходе контура W было равно нулю.

Т. к. $L \rightarrow 0$ при $(p) \rightarrow \infty$, то, как видно из выражения (22), на полуокружности V функция $D(p)$ изменяется как $T'' T''' p^3$, т. е. при обходе V , $\arg D(p)$ изменяется на 2π . Если p есть изменение $\arg D(p)$ при изменении p вдоль мнимой оси от $+j\infty$ до $-j\infty$, то для устойчивости системы должно быть:

$$\rho + 2\pi = 0 \quad (36)$$

Условие (36) можно сформулировать так: функция $D(p)$ не имеет нулей в правой полуплоскости, если радиус-вектор функции $D(j\omega)$ ($j = \sqrt{-1}$) при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ повернется вокруг начала координат в положительном направлении на угол 2π .

Перейдем к функции $\Omega(p)$. Ее полюсами являются, во-первых, нули знаменателей функций $L(p)$, которые, как уже указывалось, расположены в левой полуплоскости, во-вторых, нули функций $D(p)$, которые должны лежать в левой полуплоскости. т. к. в противном случае регулирование заведомо неустойчиво, и, наконец, в-третьих, нули функций $\eta + \varepsilon e^{-\nu p}$, которые так же всегда лежат в левой полуплоскости, как это было показано в нашей работе, упомянутой выше. Другими словами, она не может иметь полюсов в правой полуплоскости. Учитывая это и имея в виду, что на полуокружности V функция $\Omega(p)$ изменяется, как $T_A p$, легко, подобно предыдущему, установить, что эта функция не имеет нулей в правой полуплоскости, если радиус-вектор функции $\Omega(j\omega)$ при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ повернется вокруг начала координат в положительном направлении на угол π .

Таким образом, расчет устойчивости сводится к построению отображений мнимой оси плоскости p на плоскости $D(p)$ и $\Omega(p)$ или, пользуясь не совсем удачным, но вошедшим в употребление термином — к построению годографов функций $D(p)$ и $\Omega(p)$. Нужно заметить, что структура функций $D(p)$ и $\Omega(p)$ позволяет получать годо-

графы этих функций применением обычных правил сложения, умножения и деления комплексных величин, после того как предварительно построены годографы функций $L(p)$, $Q(p)$, $N(p)$. Так как функции $Q(p)$ и $N(p)$ не зависят от параметров регуляторов, а функции $L(p)$ зависят каждая только от параметров одного регулятора, то отмеченная возможность позволяет оценить влияние на устойчивость параметров отдельных регуляторов. Нужно заметить, что по самой сути изложенного метода расчета устойчивости все вычисления и построения можно делать в самом грубом приближении, в частности вполне допустимо определять модули функций $p=j\omega$ масштабной линейкой, а аргументы — обычным транспортиром.

Изложенный метод расчета устойчивости является видоизменением и развитием метода, предложенного в нашей работе¹ для параллельной работы гидротурбин. Но в отличие от упомянутой нашей работы¹, в которой была рассмотрена устойчивость не только при жестких, но и при упругих электрических связях, здесь мы рассмотрели только случай жестких связей. Полученные результаты можно было бы обобщить и на случай упругих связей, но такое обобщение, не давая ничего принципиально нового по сравнению с результатами, относящимися к гидротурбинам, не представляет большого интереса, т. к. предположение о жесткости электрических связей, за весьма редкими исключениями, не вносит ощутимых погрешностей в анализ переходных режимов первичных двигателей, о чем уже говорилось в нашей, упомянутой выше работе.

Расчет устойчивости очень существенно упрощается в тех случаях, когда эффектом самоурегулирования всех теплофикационных турбин можно пренебречь и считать их регулирование совершенно автономным. Тогда в предыдущих формулах и уравнениях все постоянные B_k нужно считать равными нулю. Формулы (22) и (24) при этом приобретают вид:

$$D(p) = -I''(p) : I'''(p) \quad (37)$$

$$S(p) = \sum_{i=1}^n \beta'_i L_i(p), \quad (38)$$

где

$$I''(p) = T''p + \sum_{i=1}^n \beta''_i L_i(p), \quad (39)$$

$$I'''(p) = T'''p + \sum_{i=1}^n \beta'''_i L_i(p). \quad (40)$$

¹ См. сноску на стр. 355.

Если функции $S_k(p)$ определяются формулой (38), то функция $Q(p)$ имеет совершенно такую же структуру как и в случае системы, имеющей только гидравлические и конденсационные турбины, и в этом случае оценка влияния на устойчивость параметров отдельных регуляторов значительно упрощается. Условие отсутствия в правой полуплоскости нулей функции $D(p)$ распадается на два самостоятельных и более простых условия отсутствия в правой полуплоскости нулей функций $I''(p)$ и $I'''(p)$. Нетрудно проверить, что эти условия будут выполнены в том случае, когда при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ каждый из радиусов-векторов функций $I''(j\omega)$ и $I'''(j\omega)$ повернется на угол π вокруг начала координат, вращаясь в контрольном направлении.

Интересно обратить внимание на то, что формулы (20), (21) и (29) в рассматриваемом случае приобретают вид:

$$\Pi''_k = -\frac{G''_k}{I''_k(p)}, \quad \Pi'''_k = -\frac{G'''_k}{I'''_k(p)}, \quad \Phi = -\frac{P}{\Omega(p)} \quad (41)$$

Отсюда видно, что изменение частоты в системе может быть вызвано только изменением электрической нагрузки и не зависит от тепловых нагрузок, а изменение давления пара в данной ступени отбора данной станции зависит только от тепловой нагрузки этой ступени отбора и не зависит от изменений других нагрузок, т. е. автономность регулирования полностью сохраняется и при параллельной работе турбины.

Гидро-Электрическая Лаборатория
Водно-Энергетического Института
Академии Наук Армянской ССР

Ն. Ա. Գալստյանի մասին

ՀԻՊԴԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՏՈՒՐԲԻՆՆԵՐԻ ԵՎ ՇՈԳԵՏՈՒՐԲԻՆՆԵՐԻ
ՋՈՒԳԱՇԵՌ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԴԵՊՐՈՒՄ ՆՐԱՆՑ ԿԱՆՈՆԱՎՈՐՄԱՆ
ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա. Մ. Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոգիմուտ քննարկված է հիդրավլիկական (կամ շոգեկոնդենսացման) և շոգեջերմացման տուրբինների սարքավորումից բաղկացած էներգետիկ ֆաբրիկի մեջ սկզբնական շարժիչների կանոնավորման կայունությունը:

Ենթադրվում է, որ ջերմացման յուրաքանչյուր տուրբին ունի 2 կանոնավորող շոգեբեղունիչ և որ քննարկվող ֆաբրիկի կազմի մեջ մանող յուրաքանչյուր ջերմաէլեկտրակոնսերտի տուրբինները զուգահեռ են աշխատում ոչ միայն էլեկտրական ցանցի համար, այլ և բարձր և ցածր

ճնշման ջերմային ցանցի համար: Հեղինակը նշում է, որ սույն խնդրի
ընդհանուր լուծումը չափազանց բարդ է: Նա սահմանափակվում է մաս-
նակի, բայց ավելի շատ գործնական նշանակութուն ունեցող դեպքով,
երբ ջերմացման տուրբինների կանոնավորումը բավարարում է ավտոմատ
պալ-մաններին և այդ դեպքի համար ընդհանրացնում է պնդյալում իր
առաջարկած հիդրավլիկական տուրբինների կայունությունը կանոնավորող
հայտանիշը: