

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 52 (1961)
Heft: 8

Artikel: Probleme der Regelung hydraulischer Turbinen
Autor: Seeberger, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916828>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Probleme der Regelung hydraulischer Turbinen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 19. Januar 1960 in Bern,
von F. Seeberger, Zürich

621.224—5

Es wird gezeigt, wie der Rohrleitungsdurchmesser und die Schwungmassen des Generators sich auf die Geschwindigkeit der Leistungsänderung einer Wasserturbine auswirken. Diese Geschwindigkeit ist, wie an zwei Beispielen gezeigt wird, sehr klein. Ferner wird auf den Nachteil der durch die Öffnungsbegrenzung blockierten Turbinen hingewiesen; diese Maschinen helfen nicht mit, die Netzfrequenz zu stützen.

Cet exposé indique l'influence du diamètre de la conduite forcée et des masses tournantes de l'alternateur sur la rapidité de réponse d'une turbine hydraulique. Ainsi que deux exemples le démontrent, cette rapidité est très petite. De plus on fait ressortir le désavantage du blocage des turbines par le limiteur d'ouverture; ces groupes n'aident pas à maintenir la fréquence du réseau.

Die Regelungsfähigkeit einer Wasserturbine wird durch die Geschwindigkeit ihrer Leistungsänderung unter dem Einfluss der Stabilisierungsorgane des Reglers ausgedrückt. Sie lässt sich mit Hilfe der Stabilitätstheorie berechnen und ist sehr klein.

Ausgangspunkt für die Stabilitätsuntersuchung der Wasserturbinenregelung ist immer die Anlaufzeit der die Turbine durchfliessenden Wassermassen. Diese lässt sich berechnen durch die Formel:

$$T_l = \frac{lv}{gH}$$

- l Länge der geschlossen geführten Wassersäule,
- v mittlere Wassergeschwindigkeit,
- g Erdbeschleunigung,
- H wirksames Gefälle.

Je grösser das Verhältnis zwischen Rohrleitungslänge und Gefälle ist, umso grösser ist die Anlaufzeit der Wassermassen und umgekehrt.

Bei Niederdruckturbinen ist die abgewinkelte Länge zwischen Turbineneinlauf und Saugrohrenende für ein gegebenes Gefälle, also auch für eine gegebene mittlere Geschwindigkeit, proportional dem Laufrad-Durchmesser und daher in erster Annäherung proportional der Wurzel aus der Turbinenleistung. Die grössten Anlaufzeiten der Wassermassen ergeben sich daher bei grossen Niederdruckturbinen, und zwar ist beispielsweise eine Turbine von 29 500 kW (40 000 PS) zweimal schwieriger zu regeln als eine unter dem gleichen Gefälle arbeitende von 7360 kW (10 000 PS).

Bei sehr hohem Gefälle kommt noch der Einfluss der Alliévischen Rohrleitungskonstanten hinzu, so dass auch in diesem Gebiet grosse Wasser-Anlaufzeiten vorkommen.

Besonders interessiert hier der Einfluss der Wassergeschwindigkeit. Dieser ergibt sich aus der durch Rohrleitung und Turbine fliessenden Wassermenge dividiert durch den mittleren Querschnitt. Da dieser eine quadratische Funktion des Durchmessers ist, ist es die Anlaufzeit der Wassermassen ebenfalls.

Die Stabilität eines Regelvorgangs lässt sich in einfachster Weise beschreiben durch die Formel:

$$\delta_t T_i T_a = k T_l^2 \quad (2)$$

- δ_t der Proportionalbereich des Reglers,
- T_i seine Nachstellzeit,
- T_a die Anlaufzeit der Schwungmassen,
- k Konstante, die vom Abklingverhältnis der Regelschwingungen und von der Selbstregelung von Turbine und Netz abhängt.

Das Produkt $\delta_t T_i$ wird als Reaktionszeit bezeichnet, in der französischen Literatur als temps caractéristique de la promptitude oder kurz promptitude. Wie aus

der Gl. (2) ersichtlich, ist sie eine quadratische Funktion der Anlaufzeit der Wassermassen und damit eine Funktion vierter Potenz des Rohrleitungsdurchmessers.

Mit Hilfe der Reglergleichung lässt sich die Reaktionszeit mit der Turbinenöffnung in Verbindung bringen. Die Gleichung eines PI-Reglers, wie er für Wasserturbinen verwendet wird, ist eine Differentialgleichung erster Ordnung und lautet:

$$\delta_t T_i \dot{y} + T_i \dot{x} + x = 0 \quad (3)$$

- x relative Abweichung der Drehzahl oder der Netzfrequenz,
- y relative Abweichung der Turbinenöffnung.

Wird die Frequenzabweichung konstant angenommen und mit x_0 bezeichnet, so ist $\dot{x} = 0$. Nach y aufgelöst, erhält man:

$$\dot{y} = - \frac{x_0}{\delta_t T_i} \quad (4)$$

Ist die Frequenzabweichung in Prozenten angenommen, so gibt dieser Ausdruck die Änderungsgeschwindigkeit der Turbinenöffnung in Prozenten pro Sekunde. Wird mit P [kW] die Leistung einer Maschine bezeichnet, so erhält man die Geschwindigkeit der Leistungsänderung [kW/s] zu:

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{x_0}{\delta_t T_i} \cdot \frac{P}{100} \quad (5)$$

Das Minuszeichen in Gl. (5) bedeutet lediglich, dass einer Frequenzerhöhung eine Produktionsabnahme entspricht und umgekehrt.

Da die Reaktionszeit $\delta_t T_i$ sich mit der vierten Potenz des Rohrleitungsdurchmessers ändert, ändert sich auch die Geschwindigkeit der Leistungsänderung in derselben Weise.

Als zweite Grösse, die neben dem Rohrleitungsdurchmesser diese Geschwindigkeit beeinflusst, erscheint in Gl. (2) die Anlaufzeit der Schwungmassen der Turbine-Generator-Gruppe. Damit der Generator möglichst billig wird, müssen die Schwungmassen so klein wie möglich sein. Wünschenswert wäre, dass sie ihren natürlichen Wert nicht übersteigen. Doch ist dies nicht immer möglich, besonders dann nicht, wenn der Rohrleitungsdurchmesser schon klein ist und der Generator gar noch ein isoliertes Netz mit frequenzunabhängigen Verbrauchern speisen muss.

Folgende zwei Beispiele zeigen, welches die Grössenordnung der Geschwindigkeit der Leistungsänderung ist:

Beim ersten Beispiel handelt es sich um eine Maschinengruppe von 50 MW, die unter einem Gefälle von 1000 m arbeitet; beim zweiten um eine solche von 30 MW mit einem Gefälle von 15 m. In beiden Fällen

ist die Reaktionszeit zu 1,5 s angenommen, womit sich bei einer Frequenzabweichung von 0,2 Hz eine Geschwindigkeit der Leistungsänderung von 0,27 %/s ergibt. Für die 50-MW-Gruppe macht dies rund 130 kW/s und für die 30-MW-Gruppe rund 80 kW/s.

Es fragt sich nun, ob diese Werte als gross genug erachtet werden. Die Studienkommission für die Regelung grosser Netzverbände des SEV wäre froh, solche Wertangaben zu erhalten. Damit diese allgemein verwertbar sind, sollten sie in Prozenten pro Sekunde angegeben sein.

Mit den Anlaufzeiten der Wassermassen und diesen Geschwindigkeiten der Leistungsänderung richten sich die Schwungmassen nach der im Netz enthaltenen Selbstregelung. Je nachdem, ob die Leistung sich linear mit der Frequenz ändert oder unabhängig von dieser ist, ändern sich die Schwungmassen bei optimaler Einstellung des Reglers im ersten Beispiel im Verhältnis von 1 : 1,8, im zweiten im Verhältnis von 1 : 1,5. Es erübrigt sich, an dieser Stelle mehr über Schwungmassen und Selbstregelung auszuführen, da diese Einflüsse Gegenstand eines anderen Artikels sein werden.

Ist die Geschwindigkeit der Verbrauchsänderung grösser als die berechnete Produktionsänderung, so bedeutet dies, dass die Frequenzabweichung grösser ist als angenommen. Aus diesem Grunde wäre eine genaue Kenntnis der Verbrauchsänderung wünschenswert.

Die kleine Geschwindigkeit der Produktionsänderung erweist sich als besonders störend bei Steuervorgängen, also wenn der Schaltwärter die Leistung verstellt. In den letzten Jahren sind jedoch Vorrichtungen entwickelt worden, die diesen Übelstand beheben. An Turbinen, deren Leistung täglich mehrmals verändert werden muss, beispielsweise nach einem Programm, eignet sich eine Potentiometersteuerung. Mit einer solchen kann die neue Leistung mittels einer Skala sofort eingestellt werden. Die Turbinenöffnung folgt dieser Änderung mit der der Dämpfungseinstellung entsprechenden Verzögerung. Turbinen von Spitzenkraftwerken, deren Leistung rasch grossen Verbrauchsänderungen folgen muss, werden dagegen vorteilhafterweise mit einer Vorrichtung ausgerüstet, welche die Dämpfungswirkung bei Steuervorgängen aufhebt.

Kleine Anlagen sind bezüglich Stabilität meistens gefährdeter als grosse. Dies wird vielfach nicht beachtet in der Meinung, die Stabilität sei ja dadurch gesichert, dass der Generator auf ein grosses Netz arbeite. Doch muss die Stabilität der auch allein arbeitenden Gruppe gewährleistet sein, da Netztrennungen immer vorkommen. Dabei ist es möglich, dass solche kleine Gruppen eine relativ grosse Leistung abgeben müssen, wenn ein isoliertes Netz versorgt werden muss, und der kritische Punkt gerade bei Vollast liegt. Grosse Einheiten sind diesbezüglich weniger gefährdet, da sie im Alleinbetrieb meistens nur wenig belastet sind. Ausnahmen kommen natürlich auch hier vor.

Im Wert k in der Stabilitätsformel ist aber nicht nur der Einfluss der Selbstregelung, sondern auch derjenige des Abklingverhältnisses der Regelschwingun-

gen enthalten. Vielfach wird verlangt, der Übergang auf einen neuen Beharrungszustand müsse ohne schädliche Schwingungen, ja sogar aperiodisch erfolgen. Für diesen Fall müsste aber die Reaktionszeit bei gleichbleibenden Schwungmassen wesentlich über die heute üblichen Werte erhöht werden und die Geschwindigkeit der Produktionsänderung würde entsprechend sinken; mit anderen Worten: Die Netzfrequenz würde wesentlich verschlechtert. Lieber also einige Schwingungen in Kauf nehmen. Man beachte jedoch, dass es sich hier immer um Schwingungen unter Last und nicht um plötzliche Vollentlastungen handelt. Bei solchen ist ein aperiodischer Übergang anzustreben.

Bei dieser Gelegenheit sei auch darauf aufmerksam gemacht, dass Drehzahlanstiege bei Abschaltungen nur in seltenen Fällen als Kriterium für die Frequenzhaltung angesehen werden können, nämlich dort, wo im Einzelbetrieb relativ grosse plötzliche Verbrauchsänderungen vorkommen. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Eigenbedarfsgruppen von Kraftwerken.

Als letzter Punkt sei noch eine Stabilitätsreserve erwähnt, nämlich die durch die Öffnungsbegrenzung blockierten Turbinen der Laufkraftwerke. Die Studienkommission des SEV für die Regelung grosser Netzverbände ist sich darin einig, dass der Betrieb mit Hilfe der Öffnungsbegrenzung trotzdem verlassen werden muss. Sie hat deshalb auch den im Bulletin des SEV erschienenen Artikel von M. Tiercy veranlasst¹⁾. Dieser ist allerdings dahingehend zu ergänzen, dass die Öffnungsbegrenzung geschaffen wurde zum Schutze der Generatoren vor Überlastung bei stark wechselndem Turbinengefälle. Heute aber wird sie benützt, um die Turbinenöffnung trotz der stets vorhandenen Frequenzschwankungen konstant zu halten zum Schutze der Uferböschungen. Verändert wird diese Öffnung nur durch den Schaltwärter bei Änderungen der zufließenden Wassermenge. Das wäre an sich schön und recht. Doch hat diese Betriebsart den grossen Nachteil, dass sich die blockierten Turbinen auch bei starken Frequenzabsenkungen nicht öffnen können und deshalb die Frequenz nicht stützen helfen. Es muss aber nicht nur für die Sicherheit der Uferböschungen, sondern auch für die Kontinuität des Betriebes gesorgt werden. Schon viele ausländische Kraftwerke sind deshalb dazu übergegangen, den Betrieb mit Hilfe der Öffnungsbegrenzung zu verlassen und dafür an den Reglern eine grosse Statik einzustellen.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, bei Netzfrequenz wohl mit der Öffnungsbegrenzung zu arbeiten, diese aber bei einer einstellbaren Frequenzabsenkung aufzuheben. Dies ist mit einer einfachen Steuerung möglich. Das anzustrebende Ziel wäre es wert, durch einen Grossversuch, an dem alle Kraftwerke eines Fluss-Systems mitmachen müssten, zahlenmässige Unterlagen zu sammeln, um den praktischen Beweis zu erbringen, dass die eintretenden Niveauänderungen für die Uferböschungen keine Gefahr bedeuten.

Adresse des Autors:

F. Seeberger, Dipl. Masch.-Ing. ETH, Escher Wyss AG, Escher-Wyss-Platz, Postfach Zürich 23.

¹⁾ Siehe Bull. SEV Bd. 51(1960), Nr. 13, S. 650...651.