Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 84 (1993)

Heft: 16

Artikel: Optimierung der Laständerungsgeschwindigkeit im Kraftwerk Walchensee

Autor: Richter, Werner

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902711

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: 09.07.2025

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

Die durch erhöhte Anforderungen an die Laständerung mit dem Verbundbetrieb entstandene Aufgabenstellung wird erläutert und das Anlagenkonzept im Kraftwerk Walchensee der Bayernwerk AG beschrieben. Besonders wird auf die schrittweise Realisierung eingegangen, die trotz der komplexen Aufgabe eine zügige Inbetriebsetzung ermöglichte.

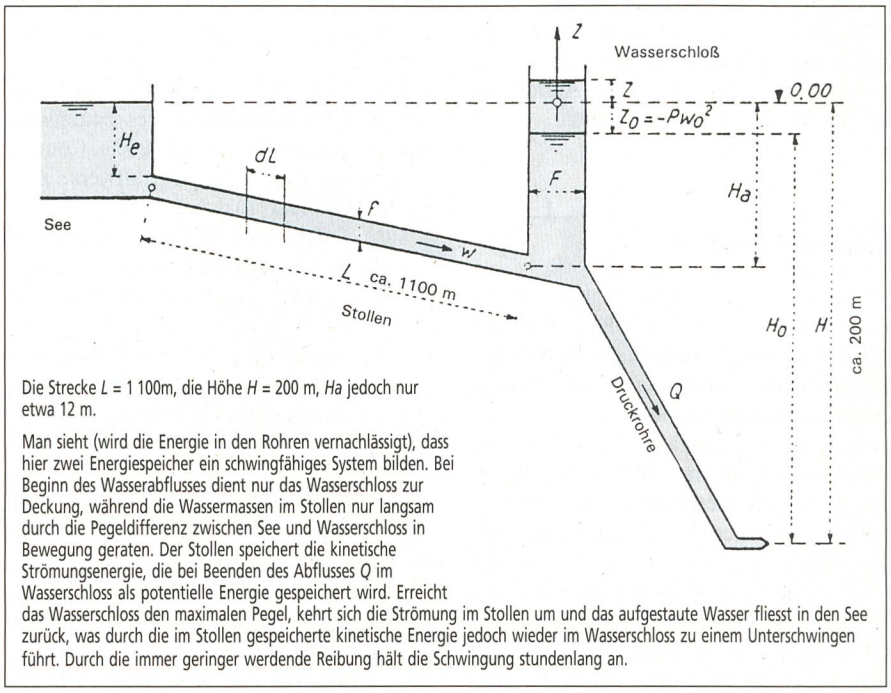
Optimierung der Laständerungsgeschwindigkeit im Kraftwerk Walchensee

■ Werner Richter

Das Kraftwerk als hydraulisches System

Als das Kraftwerk Walchensee Anfang der zwanziger Jahre dieses Jahrhunderts geplant und gebaut wurde, war es zwar im Hinblick auf eine weitere Elektrifizierung von Industrie und Gewerbe projektiert, jedoch war das entsprechende Anwachsen des Energiebedarfs nicht unumstritten. Daher wurde ein Teil der installierten Leistung für Bahnstrom ausgebaut, wo die Anwendung offenkundig vorteilhaft und die Abnahme gesichert war.

Es wurde die Höhendifferenz von 200 m zwischen Walchensee und Kochelsee genutzt und die nötige Wassermenge in einem etwa 1100 m langen Stollen durch den Kesselberg geleitet, wo als Abschluss das sogenannte Wasserschloss errichtet wurde (Bild 1). Von diesem führen sechs Druckrohre über 200 m Höhendifferenz zu den Turbinen am Ufer des Kochelsees. Der Stollen hat 4,8 m Durchmesser, was einem Querschnitt von



Die Strecke L = 1 100m, die Höhe H = 200 m, Ha jedoch nur etwa 12 m.

Man sieht (wird die Energie in den Rohren vernachlässigt), dass hier zwei Energiespeicher ein schwingfähiges System bilden. Bei Beginn des Wasserabflusses dient nur das Wasserschloss zur Deckung, während die Wassermassen im Stollen nur langsam durch die Pegeldifferenz zwischen See und Wasserschloss in Bewegung geraten. Der Stollen speichert die kinetische Strömungsenergie, die bei Beenden des Abflusses Q im Wasserschloss als potentielle Energie gespeichert wird. Erreicht das Wasserschloss den maximalen Pegel, kehrt sich die Strömung im Stollen um und das aufgestaute Wasser fliesst in den See zurück, was durch die im Stollen gespeicherte kinetische Energie jedoch wieder im Wasserschloss zu einem Unterschwingen führt. Durch die immer geringer werdende Reibung hält die Schwingung stundenlang an.

Bild 1 Prinzipdarstellung des hydraulischen Systems (aus Gründen der Übersicht nicht massstäblich dargestellt)

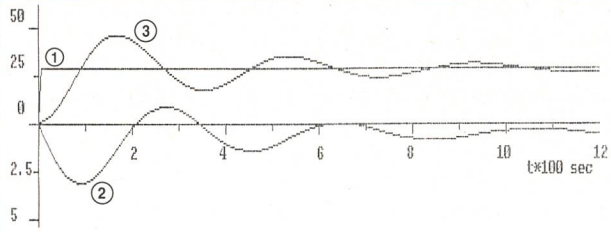
Adresse des Autors:
Werner Richter, Dipl.-Ing., SAT AG, Gewerbestrasse 9, 6330 Cham.

18,1 m² entspricht, und enthält etwa 20000 t Wasser. Für Vollast wird etwa 85 m³/s Wasser benötigt (entspricht einer Leistung von etwa 150 MW). Dabei wird im Stollen eine Geschwindigkeit von 4,7 m/s, bzw. 17 km/h erreicht. Die gesamte hierbei im Stollen bewegte Masse entspricht etwa 300 mehrachsigen Kohletransportwaggons zu je 65 t, was bei einer Zuglänge von etwa 30 Waggons zehn Zügen entspricht.

Zur gefahrlosen Beherrschung dieser Energien ist am Stollenausgang vor den Druckrohren das Wasserschloss eingefügt, das im Ruhezustand mit dem Seepegel ausgependelt ist. Wird nun von den Turbinen über die Druckrohre Wasser entnommen, so fällt zunächst der Pegel im Wasserschloss (Gesamtinhalt bei vollem See etwa 3500 m³). Durch die entstehende Pegeldifferenz beginnt allmählich das Wasser durch den Stollen zu fliessen, wobei anfänglich die Reibungsverluste noch gering sind, mit zunehmender Entnahme bis zur Vollast jedoch mit dem Quadrat der Geschwindigkeit ansteigen. Hierbei stellt sich nach einigen Schwingungen ein Gleichgewichtszustand ein und das Wasser strömt gleichmässig durch Stollen, Wasserschloss, Druckrohre und Turbinen in den Kochelsee. Der Wasserspiegel im Wasserschloss liegt dabei 4,5 m unter dem Pegel des Walchensees. Diese «Geschwindigkeitshöhe» ist nötig, um die Reibungsverluste im Stollen zu decken. Wird nun die Abnahme durch die Turbinen beendet, so bleibt die kinetische Energie des Wassers im Stollen erhalten und muss vernichtet werden. Hier setzt die Funktion des Wasserschlosses ein. Der Wasserstrom im Stollen staut das Wasser im Wasserschloss so lange auf, bis die gesamte kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt ist. Sodann kehrt sich die Flussrichtung um, das aufgestaute Wasser fliesst in den See zurück und wird jetzt ebenfalls nur durch die Pegeldifferenz gebremst, so dass ein deutliches Unterschwingen unter den Seepegel auftritt. Es kommt zu einer aperiodisch gedämpften Schwingung, die durch die nunmehr immer geringer werdenden Reibungsverluste bis zu zehn Stunden und mehr andauert. Durch die grossen Massen und die relativ lose Kopplung weist das System eine Eigenfrequenz von etwa sechs Minuten auf, die weitgehend unabhängig von Seepegel und Lastzustand ist.

Im Lastbetrieb kommen durch die Wasserströmung im Stollen die Reibungsverluste hinzu, die die Schwingneigung unterdrükken. Es klingt daher die Schwingung nach einer Lastaufnahme rasch ab, während die Schwingung nach einer Lastreduzierung lange andauert. Die Einsenkung im Wasserschloss hängt jetzt von dem Gradienten ab, mit dem die Lastaufnahme durchgeführt wird oder, mit anderen Worten, je schneller das Wasser durch die Druckrohrleitungen entnommen wird, desto grösser wird die Pegeldifferenz zwischen Wasserschlosspegel und Seepegel, da die Beschleunigung der Wassermassen im Stollen nur durch die Pegeldifferenz zwischen See und Wasserschloss begonnen wird. Es ist daher bei der normalen Lastaufnahmegeschwindigkeit von etwa 20 s von Leerlauf auf Vollast die vollständige Lastaufnahme zu einem Zeitpunkt bereits abgeschlossen, wo noch keine nennenswerte Einsenkung im Wasserschloss vorhanden ist, und daher auch noch keine nennenswerte Beschleunigung des Wassers im Stollen, das ja die Abflussverluste decken soll. Die Absenkung geht daher weiter und die Auswirkung der Lastaufnahme, die in 20 s vollendet ist, wird in voller Grösse erst 120 s nach der Lastaufnahme mit der tiefsten Einsenkung im Wasserschloss erreicht. Ist diese Einsenkung so tief, dass die Einlassöffnungen der Druckrohre freiliegen, so ist es nur mehr durch Schnellschluss der Turbinen mit allen nachteiligen Folgen möglich, schwere Schäden zu verhindern. Um diese Notmassnahme zu vermeiden und jeweils nur einen noch sicheren Minimalpegel anzufahren, muss zum Zeitpunkt der Lastaufnahme bereits feststehen, mit welchem Gradient welche Lastaufnahme erfolgen kann.

Bild 2 Eine Kurve der berechneten Lastaufnahme



Ausdruck einer berechneten Kurve für eine Lastaufnahme von 34% Kraftwerksleistung (entspricht 50% Drehstromleistung) in 20 s.
Dargestellt ist die Lastaufnahme in Kurve 1 (Wasserabfluss *QE*), die daraus entstehende Einsenkung im Wasserschloss (Kurve 2) und die verzögert einsetzende, phasenverschobene Schwingung des Zuflusses *Q* zu (Kurve 3). Man erkennt auch die relativ rasche Beruhigung und das Einstellen auf den neuen Wasserschlosspegel, jetzt unter dem ausgependelten Seeniveau.

Moderne Anforderungen

Die Anlage wurde mit dem Wasserschloss errichtet, damit ein teilweise entkoppelter Betrieb der Turbinen möglich ist. Dies war auch für das Einstellen der Turbinenleistung nach Schaltbefehl über Telefon oder nach einem Fahrplan völlig ausreichend, da bei einiger Erfahrung und Schulung das Wartenpersonal die Lastaufnahme entsprechend vorsichtig vornehmen konnte.

Die heutigen Verhältnisse sind jedoch völlig anders. Das Walchenseekraftwerk ist im Rahmen der Bayernwerk AG Teil des europäischen Gesamtnetzes mit über 300 GW. Alle Kraftwerke arbeiten innerhalb enger Spannungs- und Frequenzgrenzen im Verbund und werden auch zentral von der Netzleitstelle geführt. Dies ergibt neue und wesentlich engere Anforderungen, denn gerade die Wasserkraftwerke sind mit der hohen möglichen Laständerungsgeschwindigkeit den kalorischen Kraftwerken überlegen, und es werden daher die Wasserkraftwerke und Pumpspeicherwerke zur Deckung von Spitzenlasten herangezogen. In diesem Zusammenhang wird das Walchenseekraftwerk dann vom Lastverteiler ferngeregelt und kann in kürzester Zeit vom Leerlauf auf Vollast gesteuert werden und umgekehrt. Dabei kann das schwingfähige System Triebwasserstollen/Wasserschloss so aufgeschaukelt werden, dass kein Betrieb mehr möglich ist.

Die Aufgabenstellung (Bilder 2 und 3)

Eine mögliche Vorkehrung besteht darin, die Lastaufnahmegeschwindigkeit so zu reduzieren, dass keine gefährlichen Schwingungen auftreten können, bzw. nach wie vor jede Änderung durch das Wartenpersonal durchführen bzw. überwachen zu lassen. Ganz allgemein kann gesagt werden, dass ein einfaches Begrenzen der Laständerung nicht ausreichend ist, da sich durch die Fernsteuerung eine Ansteuerung genau in der Eigenfrequenz ergeben und dadurch die Schwingung so aufgeschaukelt werden kann, dass Schäden entstehen. Um die optimale Stellgeschwindigkeit möglichst voll zu nutzen, ist es notwendig, die für eine gewünschte Lastaufnahme nötige Einsenktiefe genau vorherzusehen, mit dem gegenwärtigen Schwingzustand im Wasserschloss zu vergleichen und eventuell die Lastaufnahme in Betrag oder Anstiegsgeschwindigkeit zu reduzieren.

Um die Vorgänge im Detail zu studieren, wurde ein mathematisches Modell eingerichtet, mit dem die Zusammenhänge zwischen Lastaufnahme und Einsenkung untersucht wurden. Es wurde hierzu das System von partiellen Differentialgleichungen für verschiedene Randbedingungen jeweils für etwa 1000 Punkte durch Iteration gelöst. Die Konstanten wurden aus den bekannten Abmessungen der Anlage berechnet, wobei aber der

einfacheren Rechnung halber die nichtzylindrische Form des Wasserschlosses und die vergleichsweise geringe Masse des Wassers in den Druckrohren beim Anfahrvorgang unberücksichtigt blieben. Nachdem einige Werteserien für verschiedene Lastaufnahmesprünge und -geschwindigkeiten plausible Werte ergaben, wurden einige signifikante Punkte ausgewählt und mit dem Kraftwerk im Modellversuch 1:1 nachgefahren. Die Ergebnisse der Aufzeichnungen stimmten mit den Vorberechnungen auf besser als 10 cm überein bei maximalen Einsenkungen von etwa 9 m. Lediglich das erste Minimum wies Abweichungen von 20 bis 30 cm auf, was auf die erwähnten ungenauen Anfangswerte zurückgeführt werden konnte. Da aber die Resultate im gesamten so zufriedenstellend waren, wurden am mathematischen Modell keine Änderungen mehr vorgenommen, sondern damit ein vollständiges Feld von Einsenktiefen in Abhängigkeit von Lastaufnahmebetrag und -geschwindigkeit berechnet. Damit stand eine dreidimensionale Fläche zur Verfügung mit den Achsen Einsenktiefe, Lastaufnahmebetrag und Lastaufnahmegradient. Dies ermöglicht zum Beispiel, für die Schnittebene einer bestimmten Einsenktiefe eine Kurve für die Abhängigkeit von Lastaufnahmebetrag und -geschwindigkeit abzulesen.

Ein Rechner, der mit dieser «Erfahrung» ausgerüstet ist, müsste die Vorausberechnung des mathematischen Lastaufnahmegradienten beherrschen.

Realisierung

Da die Realisierung in einem Automatisierungsgerät mit Programmierung in Funktionsplantechnik erfolgen sollte, wurde als Vorübung und zum Testen vorerst das Modell nochmals in dieser Technik aufgebaut, wobei Seepegel und Wasserabfluss (Kraftwerksleistung) als Analogwerte vorgegeben wurden und das Programm Werte für Zufluss und Wasserschlosspegel als Analogwerte ausgab. Es war auch vorgesehen, damit den Einfluss von Schwingungen im Wasserschloss auf die Einsenkung zu studieren, da das mathematische Modell immer vom eingeschwungenen Zustand berechnet worden war.

Es ergab sich bei dieser Testanlage zwar ein Zeitraffereffekt, der die Schwingzeit von 6 min auf etwas weniger als 1 min zusammendrängte, aber die erhoffte Reduktion der Schwingzeit auf etwa 1 s konnte damit nicht erreicht werden, und so war auch der Test mit dem schwingenden Wasserschloss optisch nicht einfach möglich. Es hätten dazu eine Vielzahl von Schreibern verwendet werden müssen. Dieser relativ grosse apparative Aufwand wurde nicht gemacht, sondern es wurde beschlossen, die Schwingung bei der Inbetriebsetzung zu berücksichtigen.

Aufbau der Anlage

Die Anlage besteht aus einer SAT-SK-1703-Automatisierungskomponente, die drei Baugruppen (GPU) für speicherprogrammierbare Steuerungen (VSR-Firmware Verknüpfen, Steuern, Regeln) und die nötigen Ein- und Ausgabebaugruppen für Binärsignale und Analogwerte enthält. Der Komponente nachgeschaltet sind als Handsteuerebene je Maschinengruppe vier handelsübliche Kompaktregler, die die Sollwertvorgaben des Reglers an die Elektrohydraulischen Turbinenregler (EHTR) bzw. im Endeffekt Stellbefehle an die Leitapparate weitergeben. Diese Kompaktregler enthalten Anzeige- und Stellmöglichkeiten der Handebene und sind in Maschinenpulten angeordnet. Die Bedienung des Reglers selbst erfolgt über ein Steuerfeld mit Befehls- und Anzeigegeräten im Mittelpult. Die Steuer- und Regelfunktionen für Drehstrom- und Einphasenmaschinen sind zwar ähnlich, aber auf getrennten unabhängigen Baugruppen ausgeführt. Die Vorausberechnung der Wasserschlossdaten erfolgt für beide Maschinengruppen gemeinsam auf der dritten Baugruppe.

Die Anlage verarbeitet Sollwertvorgaben für die Drehstromleistung vom Pult (Bedienung ORT) oder von der Fernregelung durch die Netzleitstelle Karlsfeld (Stellung FERN) für jede Maschine einzeln, für die Einphasenleistungsvorgaben vom Pult (Bedienung ORT) oder von der Fernregelung durch die Zentrale in Frankfurt über Pasing und Karlsfeld (Stellung FERN) für alle Maschinen gemeinsam. Der Rechner begrenzt dabei die Wasserschlossschwingung in Abhängigkeit vom Seepegel und dem jeweiligen Schwing- und Lastzustand durch Vorgabe eines entsprechenden Lastgradienten. Bei Ausfall der Messwerte (Sollwert, Istwert, Wasserschlosspegel, Seepegel) bzw. des Rechners selbst wird automatisch stossfrei auf Handverstellung über die Kompaktregler für die einzelnen Maschinen umgeschaltet. Die Rückschaltung von Hand- auf Automatikbetrieb erfolgt für jede Maschine einzeln am Kompaktregler, wenn der Regler samt Eingangswerten störungsfrei arbeitet.

Es sind folgende Betriebsarten möglich:

FERN – direkte Sollwertvorgabe vom Lastverteiler Karlsfeld.

ORT – Sollwertvorgabe vom Wartenpult für alle Drehstrommaschinen gemeinsam, mit Steuerung des Lastaufnahmegradienten durch den Rechner.

Diese beiden Betriebsarten sind nur möglich, wenn die unterlagerten Kompaktregler der einzelnen Maschinen auf AUTO stehen.

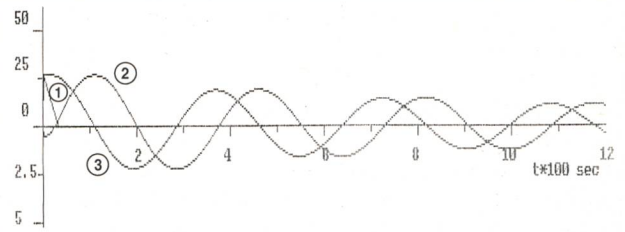
HAND – Sollwertverstellung für jede Maschine einzeln am Kompaktregler, keine Automatik.

Da die Einphasen-Fernregelung sehr unruhig erfolgt, wurde hier eine grössere Grundstellzeit eingebaut. Die Stellzeit für die Drehstrommaschinen ist im nicht begrenzten Zustand (hoher Seepegel, ruhiges Wasserschloss) etwa 20 s von Leerlauf auf Vollast.

Gradientenbildung (Bild 4 und 5)

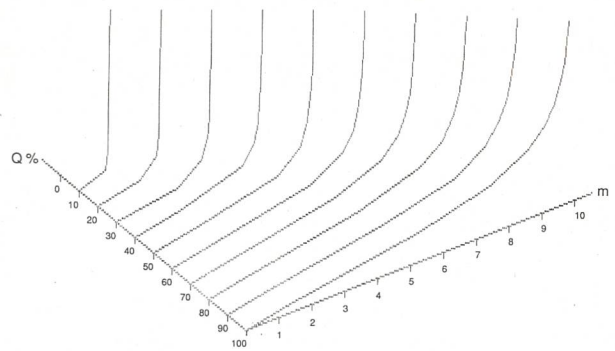
Ausgehend von Berechnungen am mathematischen Computermodell der hydraulischen Anlage des WKW wurde eine dreidimensionale Kurvenschar erstellt, die bei vorgegebenen Einsenktiefen für den Wasserschlosspegel und der geforderten Lasterhöhung den maximalen Anstieg für die Leistungsaufnahme ausgibt. Es entspricht also jeder Leistungserhöhung (Lastsprung, Differenz zwischen Ist- und Sollwert) ein Wert für die kürzeste Anstiegszeit, der von der zulässigen Einsenktiefe abhängt.

Im laufenden Betrieb wird die maximale Einsenktiefe aus der Differenz zwischen dem stationären Wasserschlosspegel bei der jeweiligen Istleistung und dem vorgegebenen



Ausdruck einer berechneten Kurve für eine Lastreduktion von 34% in der Zeit von 40 s (Entlastung zu Bild 2). Es bedeuten wie in Bild 2:
Kurve 1: Wasserabfluss *QE*.
Kurve 2: Wasserschlosspegel, der von dem stationären Zustand (Geschwindigkeitshöhe) durch das Beenden der Abnahme (in diesem Fall etwa 4 m) angestaut wird, bis der Zufluss durch Null geht (Kurve 3). Die Schwingung ist sehr wenig gedämpft und beruhigt sich erst ausserhalb des berechneten Zeitraums.
Kurve 3: Stollenzufluss, der seine kinetische Energie in den Wasserstau im Stollen abgibt. Die Reibungsverluste sind dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit proportional und nehmen dadurch sehr rasch ab.

Bild 3 Eine Kurve der berechneten Lastabnahme



Axiometrische Darstellung der Kurvenscharen zur Vorausbestimmung der Gradienten aus Lastsprung Q in % und der freien Schwinghöhe in Metern. Man sieht hier den fast linearen Zusammenhang zwischen Einsenktiefe und Höhe des Lastsprunges und den relativ scharfen Knick der Gradientenkurven bei Überschreiten einer gewissen Einsinktiefe. Durch dieses Verhalten des Systems kann man einen relativ grossen Bereich unter der Kurve «ungebremst» fahren, sofern man grosse Lastsprünge rechtzeitig und sicher erkennt und sofort den Gradienten zurücknimmt (flacher Teil der Kurven).

Bild 4 Axiometrische Darstellung, Wirkungsweise der Begrenzung

Wasserschlossminimum bestimmt. Dazu müssen die Stollenverluste im Näherungsverfahren über die Nachbildung einer kubischen Parabel laufend mitgerechnet werden. Der umgerechnete Seepegel abzüglich untere Grenze (Grundwert) und den Stollenverlusten ergeben als eine Eingabe für die Kurvenschar die freie Schwinghöhe.

Die Anlage ist drehstromseitig so ausgelegt, dass grundsätzlich die kürzeste Anstiegszeit von 20 s freigegeben wird. Es ist daher wesentlich, die Änderungen des Sollwertes sofort zu erfassen und so lange festzuhalten, bis die Leistungserhöhung durchgeführt worden ist. Dies ist aus zwei Gründen nötig. Einmal ist durch die dynamische Reduktion des Lastanstiegsgradienten die Notwendigkeit zum Festhalten der Laständerung bis zum Erreichen des Gleichstandes zwischen Soll und Ist gegeben, zum anderen ist die Speicherung zur vollständigen Erfassung eines Lastsprunges überhaupt notwendig. Wird zum Beispiel die Sollwertvorgabe um 50% in 20 s erhöht, so folgt ohne Begrenzung die Istleistung praktisch genau der Sollwertvorgabe (20 s für 100% Lastaufnahme, daher 10 s für 50%) und es tritt keine Differenz zwischen Ist und Soll auf, die zu einer Begrenzung Anlass gäbe.

Da die volle Lastaufnahme in 20 s möglich ist, während die, nicht mehr beherrschbaren, gefährlichen Auswirkungen erst frühestens in 120 s auftreten, muss der für den vorzugebenden Gradienten bestimmende Lastsprung so lange gespeichert werden, bis die Differenz zwischen Soll- und Istleistung <5% beträgt. Der Lastsprung wird aus der Differenz der Solleistung zu dieser gespeicherten Istleistung bestimmt und kann nur so in der vollen Höhe erfasst werden.

Dieser Lastsprung wird zusammen mit dem Seepegel (zur Definition der freien Schwinghöhe) in die Kurvenschar eingegeben. Der Ausgangswert des Kurvenschar-Modules ist der Rohgradient, mit dem die Lastaufnahme der Turbinen bestimmt wird. Die Wirkungsweise der Begrenzung zeigt Bild 5.

Dynamische Bewertung (Bild 6)

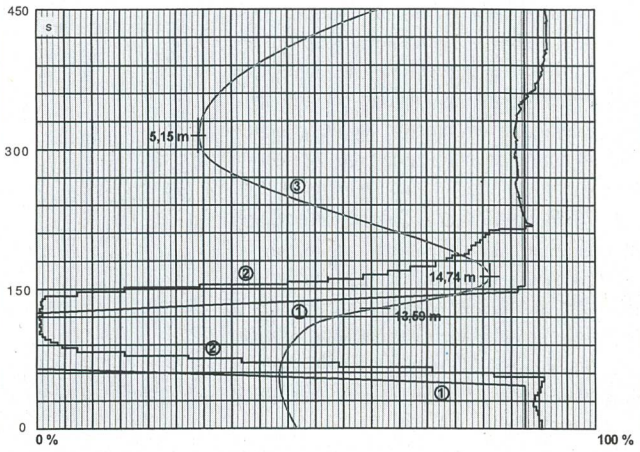
Diese Werte gelten für einen Start vom beruhigten Wasserschloss. Zur Berücksichtigung des Schwingzustandes wird laufend der sogenannte «dynamische Zustand» ermittelt. Dieser wird aus der Differenz zwischen dem aktuellen Messwert des Wasserschlosspegels und dem «stationären Zustand» (Beharrungspegel) gebildet.

Da dieser «stationäre Zustand» im Betrieb nicht erreicht wird, wird er laufend aus dem dem jeweiligen Seepegel entsprechenden Ruhepegel des Wasserschlosses abzüglich den Stollenverlusten (Geschwindigkeitshöhe) berechnet. Zusätzlich wird der Gradient des Wasserschlosspegels erfasst, der eine Aussage über den Schwingzustand ermöglicht, auch wenn der Wasserschlosspegel gerade durch Schwingungsnull läuft.

Wie die Versuche ergaben, ist die Schwingung des Wasserschlosspegels in fast jedem Teil für eine Lastaufnahme gefährlich. Zum Verständnis muss man sich vergegenwärtigen, dass im Zulaufstollen etwa 20000 m^3 Wasser beschleunigt werden müssen, was einzig und allein über die Pegeldifferenz zwischen See und Wasserschloss geschehen kann.

Im Bereich A/B (Bild 6) ist zwar der Wasserschlosspegel hoch, jedoch wird der zufliessende Wasserstrom maximal rückgestaut und die Wassersäule bewegt sich nach unten. Eine Wasserentnahme in dieser Periode verstärkt in erster Linie die in B ohnehin vorhandene Abwärtsbewegung im Wasserschloss, kann jedoch nichts zur Beschleunigung des Zuflusses beitragen. Die Folge ist eine wesentlich tiefere Einsenkung als bei einer Lastaufnahme mit beruhigtem Wasserschloss.

Für den Bereich C gilt dies ebenfalls, wobei der Zufluss bereits stärker, aber dafür der Pegel tiefer ist. Am Ende des Bereiches ist die maximale Zuflussgeschwindigkeit erreicht.



Kurve 1: Sollwertvorgabe
Kurve 2: die vom Rechner gefahrenen Kraftwerksleistung
Kurve 3: Wasserschlossschwingung. Diese Kurve wurde während der Optimierung der dynamischen Bewertung aufgenommen, wo mit simuliertem Seepegel (siehe entspr. Abschnitt) gefahren wurde, um bei etwaigen «Ausreissern» die Anlage nicht zu gefährden.

Man sieht die Lastrücknahme, um das Wasserschloss zum Aufschwingen zu veranlassen und den Beginn der Lastaufnahme unmittelbar von dem Scheitelpunkt der Pegelkurve. Der Rechnerausgang folgt dem Sollwert anfangs sehr rasch, wird jedoch mit grösserem Lastsprung immer langsamer. Das letzte Stück gibt er wieder frei, weil die Soll-Ist-Differenz in das eingestellte Totband gekommen ist, wo eine Begrenzung (siehe auch Bild 4) nicht mehr nötig ist.

Bild 5 Wirkungsweise Begrenzung

Eine Lastaufnahme zu Beginn des Bereiches D1 bewirkt jedoch vorerst eine weitere Abnahme des Wasserschlosspegels, wenn sofort im Minimum Wasser abgezogen wird. Es wurde daher ein Speicher für das jeweilige Minimum vorgesehen, so dass mit einem einstellbaren fixen Prozentsatz auf einen weiteren Bereich D2 umgeschaltet wird, in dem die volle Lastaufnahme nicht nur gefahrlos möglich ist, sondern auch einen beruhigenden Einfluss hat.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ausser im Bereich D2 in allen anderen Kurventeilen in Abhängigkeit von Gradient und dynamischem Zustand des Wasserschlosses eine mehr oder weniger tiefere Absenkung als ohne Schwingung auftritt und daher der Lastsprung jeweils höher bewertet wird. Diese Bewertung ist in Summe und auch für jeden Kurventeil getrennt einstellbar.

Zusatzeinrichtungen

Seepegelabhängige Reduktion des Grundgradienten

Da die freie Schwinghöhe im Wasserschloss mit dem Jahresgang des Seepegels zwischen 9 und 2 m schwankt, hat es sich als günstig erwiesen, die für die geringen Höhen nötigen Gradienten schon voreinzustellen. Dies wird durch eine Kurve mit einstellbaren Parametern in Abhängigkeit des Seepegels durchgeführt. Damit ist eine Grundeinstellung möglich, die eine Gradientenreduktion durch die Lastautomatik nicht so abrupt nötig macht und ein ruhigeres Verhalten gewährleistet.

Seepegelsimulation

See und Wasserschloss bilden kommunizierende Gefässe. Die beiden Pegel wurden daher im Rechner aufeinander so abgebildet, dass der ausgepegelte Zustand erkannt wird und auch die Abweichungen vom stationären Zustand bei Lastbetrieb genau erfasst werden können.

Zur Simulation des Seepegels ist es daher nicht möglich, den Messwert des Pegels allein durch eine Konstante zu ersetzen (bzw. mit einem mA-Geber extern vorzugeben), da sonst das Gleichgewicht gestört wird. Da jedoch der Wasserschlosspegel eine wesentliche Einflussgrösse für die Gradientenbildung ist, kann dieser nicht stationär vorgegeben werden, sondern muss in echten Werten übernommen werden.

Eine Lösung, die alle diese Faktoren berücksichtigt, ist die gleichzeitige Absenkung beider Pegel durch Subtraktion des jeweils entsprechenden Wertes. Da die Bewertung der Pegel unterschiedlich ist, wurde dafür ein eigener Programmteil mit verschiedenen Umrechnungen vorgesehen.

Diese Anordnung der Subtraktion des jeweils für einen Meter geltenden Wertes in beiden Pegeln garantiert eine gleichwertige Wertänderung bei Änderung des echten Seepegels.

Zusatzalarm

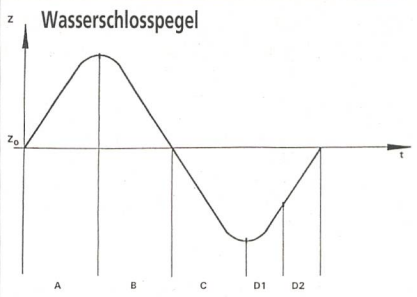
Obwohl bei funktionierendem, eingeschaltetem Rechner eine Gradientenbegrenzung in jedem Fall erfolgt und eine gemeinsame Lastaufnahme von Hand nur durch die gleichzeitige Betätigung aller vier bzw. acht SIPART möglich ist, wurde dennoch das Zusatzprogramm eingebaut, das bei Überschreiten eines einzugebenden negativen Gradienten des Wasserschlosspegels und Unterschreiten eines ebenfalls einzugebenden Absolutpegels ein Signal gibt.

Wenn daher der Wasserschlosspegel einen unteren Grenzwert mit einer zu grossen Geschwindigkeit unterschreitet, wird Alarm gegeben bzw. Leitapparat und eventuell Kugelschieber werden geschlossen.

Zusammenfassung

Mit der hier angewendeten Methode der Gradientenbegrenzung ist es möglich, die Ergebnisse der mathematischen Vorarbeiten voll zu nutzen. Es hat sich gezeigt, dass je nach dem Freiwert Lastaufnahmen von 20 bis 50% praktisch ohne Zeitlimit möglich sind, da sie keinen Einfluss auf die Einsenktiefe haben. Über diesem Wert wird die Auswirkung des Lastsprunges jedoch rasch so gross, dass eine, bereits sehr früh, das heisst bei geringen Laständerungen einsetzende, Verzögerung notwendig ist. Dies gibt für den Netzbetrieb jedoch die Möglichkeit, in einem vom Seepegel abhängenden Leistungsband die volle Geschwindigkeit des WKW zu nutzen.

Schwingungen im Wasserschloss wirken (besonders ohne Last nach dem Abstellen) über einem bestimmten Wert wie ein hoher Lastsprung und werden durch die vorgenommene Bewertung gut erfasst. Die aufwendige Bewertungslogik erlaubt die getrennte, genau abstimmbare Bewertung auch innerhalb der einzelnen Kurventeile durch die getrennte Berücksichtigung von Schwingamplitude und Gradient. Damit kann durch genaue Anpassung so lange wie nur hydraulisch noch zulässig die volle Änderungsgeschwindigkeit freigegeben werden.



Für die dynamische Bewertung sind die Schwingzustände im Wasserschloss wesentlich. Im Bereich A und B ist der Pegel zwar hoch, aber der Zufluss wird maximal rückgestaut. Im Bereich C beginnt bereits der Zufluss durch den Stollen, doch ist die Wassermenge im Wasserschloss bereits sehr gering. Im Bereich D bewirkt eine zu frühe Entnahme ein weiteres Absenken (Teilbereich D1); in D2 hat der Zufluss voll eingesetzt, und es ist auch schon ein Wasservorrat im Wasserschloss vorhanden. Hier ist der einzige Bereich, wo bei nicht zu geringem Seepegel die Lastaufnahme voll freigegeben werden kann. Dies führt zu Abfuhr der aufschwingenden Wassersäule und damit auch zu einer Beruhigung der Schwingung.

Bild 6 Diagramm der Kurventeilstücke

Die Lastreduktion wird nicht begrenzt. Allerdings begrenzt die dadurch entstehende Schwingung jede weitere wesentliche Lastaufnahme bis zum Schwingzustand D2, wo dann durch volles Freigeben die Schwingung auch sogar noch beruhigt wird.

Es wird dadurch auch ein Aufschaukeln durch periodisches Leistungsaufnehmen wirkungsvoll verhindert, wobei die anstehende Lastanforderung jedoch zum frühest möglichen Zeitpunkt (D2) voll durchgeführt wird. So wird auch bei wiederholten grossen Lastsprüngen im Netzbetrieb zwar nicht immer sofort, wohl aber in der kürzest möglichen Zeit reagiert.

Die erste Ausbaustufe mit den vier Drehstrommaschinen wurde 1989 abgeschlossen. 1991 wurden die vier Einphasenmaschinen ebenfalls in die Anlage einbezogen. Die Regelung hat sich auch im Vollausbau gut bewährt.

Optimisation de la vitesse de variation de la charge dans la centrale de Walchensee

L'article expose le problème dû, en raison de l'interconnexion, aux plus grandes exigences posées à la variation de la charge et décrit le système d'installation de la centrale de Walchensee (Bayernwerk AG). Il met tout particulièrement en évidence la réalisation graduelle qui, malgré la complexité de la tâche, a permis une rapide mise en service.