Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 76 (1984)

Heft: 3-4

Artikel: Der Asynchrongenerator : eine Alternative zum Synchrongenerator für kleine Wasserkraftanlagen mit einer Leistung bis 20.000 kW

Autor: Kallmann, Roland

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941187

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: 25.12.2025

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

Der Asynchrongenerator

Eine Alternative zum Synchrongenerator für kleine Wasserkraftanlagen mit einer Leistung bis 20000 kW

Roland Kallmann

Teil 1 Allgemeine Betrachtungen

1.1 Kleine Wasserkraftanlagen und deren Vorteile

Der zunehmende Bedarf an elektrischer Energie und die steigenden Strompreise haben zur Folge, dass in vermehrtem Masse wieder kleinere Wasserläufe für die Elektrizitätserzeugung genützt werden. Auch der Umbau bestehender, älterer Kraftwerke, die mit schlechter Ausnützung (Wirkungsgrade) und/oder aufwendiger Bedienung und Wartung arbeiten, bringt wirtschaftliche Vorteile [5].

Nebst den betrieblichen Eigenschaften der hydroelektrischen Anlagen, wie rasche Verfügbarkeit und Umweltfreundlichkeit [4, 6], liegen die Hauptvorteile in der dezentralen Nutzung der Wasserkraft in der Nähe der Verbraucher und in der Möglichkeit, unersetzliche fossile Energieträger einzusparen [8].

1.2 Asynchron- oder Synchrongenerator

Der Asynchrongenerator ist durch seine einfache Bauart mit Käfiganker sowie den Wegfall einer besonderen Erregermaschine, ferner der Spannungsregelungs- und Parallelschalteinrichtung für bedienungslose, ferngesteuerte Kraftanlagen besonders geeignet. Die Verwendbarkeit der Asynchronmaschine als Generator wurde bereits 1893 erkannt [1].

In bezug auf Betriebssicherheit, Anspruchslosigkeit im Unterhalt und Platzbedarf, Einfachheit sowie Wirtschaftlichkeit ist der Asynchrongenerator dem Synchrongenerator überlegen.

Für Rohrturbinenanlagen mit wasserumströmten Generatoren (besonders mit Drehzahlerhöhungsgetriebe) hat der Asynchrongenerator vor allem dadurch an Interesse gewonnen, weil er wegen des Wegfalls einer besonderen Forderung hinsichtlich des Schwungmomentes im Durchmesser kleiner als ein Synchrongenerator gehalten werden kann [9].

Bei Synchrongeneratoren ist – gegeben durch die hydraulischen Verhältnisse – eine minimale Schwungmasse für die Stabilität der Drehzahlregelung erforderlich. Das Schwungrad bestimmt auch die bei plötzlicher Entlastung auftretende Drehzahlsteigerung. Ist das natürliche Massenträgheitsmoment ungenügend, so kann der geforderte Wert durch ein zusätzliches Schwungrad erreicht werden. Dieses wird meistens mit dem Generator zusammengebaut.

Beim Synchrongenerator erfolgt die Erregung mit Gleichstrom, welcher über Schleifringe dem Polrad zugeführt wird. Der Gleichstrom selbst wird entweder einer vom Rotor der Hauptmaschine angetriebenen Erregermaschine (an- oder eingebaut) oder einer statischen Speiseeinheit entnommen. Bei bürstenlosen Wechselstromerregern mit rotierenden Dioden entfallen die Schleifringe. Je nach Auslegung eines Synchrongenerators ist dieser auch in der Lage, Blindleistung an das Netz abzugeben.

Im Gegensatz zum Synchrongenerator braucht der Asynchrongenerator keine andere rotierende Maschine für den zur Magnetisierung notwendigen Erregerstrom. Er muss diesen als Blindstrom vom taktgebenden Wechselstromnetz oder im Inselbetrieb den der Statorwicklung parallel geschalteten Kondensatoren entnehmen.

Drehstrom-Asynchrongeneratoren, die im Parallelbetrieb mit einem starren Netz arbeiten, den Magnetisierungsstrom vollständig oder nur teilweise von diesem beziehen (Teilkompensation durch Kondensatoren), werden zurzeit für Leistungen bis 10000 kW gebaut. Die zurzeit technisch und wirtschaftlich möglichen Grenzleistungen liegen höher. Sie sind in erster Linie nicht elektrisch begrenzt, sondern durch die mechanische Beanspruchung bei Überdrehzahl (Durchgangsdrehzahl).

Für die Beantwortung der Frage, bis zu welcher oberen Leistungsgrenze Asynchrongeneratoren noch wirtschaftlich eingesetzt werden können, ist als erstes abzuklären, in welchem Umfang die für den Asynchrongenerator benötigte Magnetisierungs-Blindleistung bei Parallelbetrieb aus dem Netz entnommen werden darf oder ob sie vollständig oder teilweise von Kondensatoren geliefert werden muss. Normalerweise wird eine Teilkompensation bis zu einem Leistungsfaktor von etwa 0,9 bis 0,93 mit Hilfe von Kondensatoren verlangt. Der restliche Blindstrombedarf wird aus dem Netz gedeckt. Über die zu treffenden Lösungen entscheidet der Wirtschaftlichkeitsvergleich: Blindstrombezug ab Kondensator oder ab Fremdnetz.

1.3 Der Drehstrom-Asynchrongenerator

Allgemein kann jede Asynchronmaschine als Generator verwendet werden. Aus wirtschaftlichen und betrieblichen Überlegungen heraus wird eine Drehstrommaschine mit Käfiganker bevorzugt.

Ein Asynchronmotor geht in den Generatorzustand über, wenn der Rotor übersynchron im Sinne des Drehfeldes angetrieben wird, der Schlupf ist dann negativ. Die Blindstromaufnahme und damit die benötigte Kapazität der Kondensatoren ist abhängig von der Belastung.

Bei gleicher thermischer Ausnützung eines Asynchronmotors als Asynchrongenerator bestimmt sich dessen übersynchrone Drehzahl aus Synchrondrehzahl plus Schlupfdrehzahl im motorischen Betrieb. Bei gegebener Spannung und Frequenz hängt die abgegebene Wirkleistung nur vom Schlupf ab. Die Drehzahl stellt sich, falls das Antriebsmoment nicht etwa das generatorische Kippmoment überschreitet, ganz automatisch entsprechend der zur Verfügung stehenden Antriebsleistung ein. Bei Turbinen bestimmt sich die Antriebsleistung aus Wasserdurchflussmenge (m^3/s) und Fallhöhe (m).

Der Wirkungsgrad der Asynchrongeneratoren ist etwas besser als derjenige von Synchrongeneratoren gleicher listenmässiger Leistung. Eigenblindleistung und Streuung der Maschine bestimmen den Leistungsfaktor eines Asynchrongenerators. Normalerweise liegt dieser im Generatorbetrieb etwa zwei bis drei Hundertstel niedriger als im Motorbetrieb. Es erübrigt sich deshalb, beim Asynchrongenerator – ähnlich wie beim Synchrongenerator – einen Leistungsfaktor vorzuschreiben. Vorwiegend wird mit praktisch konstanter Drehzahl bzw. Leistung gearbeitet, da bei Teillast der Leistungsfaktor stark abnimmt.

Die abgegebene Wirkleistung eines Asynchrongenerators ist annähernd gleich der Wirkleistungsaufnahme P der gleichen Maschine im Motorbetrieb. Unter Berücksichtigung der Verschlechterung des Leistungsfaktors durch einen Faktor k (0,97 bis 0,98) ist die Wirkleistungsabgabe P_n:

$$P_n = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot k}{1000} \text{ in kW}$$

U = Nennspannung in V
I = Nennstrom im Motorbetrieb in A
$\cos\varphi$ = Leistungsfaktor des Motors

Der Asynchrongenerator wird gewöhnlich leer hochgefahren und dann aufs Netz geschaltet. Besondere Synchroniseinrichtungen wie Phasen- und Frequenzvergleich sind

hierfür nicht erforderlich. Der Einschaltwechselstrom ist praktisch unabhängig von der Drehzahl. Er entspricht etwa der Grösse des Kurzschlussstromes der Maschine. Diesem Wechselstrom ist aber noch ein Gleichstromglied überlagert, so dass die auftretenden Stromspitzen bedeutend grösser sein können als beim stationären Kurzschluss. Wird die Asynchronmaschine auf ihre synchrone Drehzahl gebracht und auf das Netz geschaltet, klingt der Stromstoss rasch ab und erreicht schon nach Bruchteilen einer Sekunde den durch den Schlupf bestimmten Dauerstrom.
Sofern die Spannung des Verbundnetzes höher ist als diejenige, für die der Generator mit Rücksicht auf seine Leistung noch wirtschaftlich und betriebssicher ausgeführt werden kann, empfiehlt sich ein entsprechender Transformator in Blockschaltung. Diese Kombination hat den Vorteil, dass die zusätzliche Kurzschlussimpedanz des Transformators den Schaltstromstoss stark reduziert.
Um den Einschaltstromstoss zu begrenzen, werden gelegentlich an der Statorwicklung des Asynchrongenerators Anlasswiderstände oder Anlassdrosselspulen im Sternpunkt, oder bei kleineren Maschinen netzseitig, angeschlossen. Diese Widerstände bzw. Drosselspulen werden nach erfolgtem Parallelbetrieb mit dem Netz mittels verklinktem Schütz oder Trennschalter kurzgeschlossen.

1.4 Der Asynchrongenerator im Inselbetrieb

Um den Asynchrongenerator netzunabhängig zu machen, werden zur Erregung Kondensatoren verwendet. Unter Beachtung von kritischer Drehzahl und Kapazität kann sich die Asynchronmaschine infolge ihrer Remanenz – ähnlich wie bei selbsterregten Gleichstrom-Nebenschlussgeneratoren – über die Kondensatoren selbst auf die Leerlaufspannung erregen. Bei ungenügender Remanenz kann die Erregung mittels eines Stromstosses von einer Batterie durch die Statorwicklung eingeleitet werden.
Die mit Kondensatoren erregten Asynchrongeneratoren sind dann in der Lage, allein ein selbständiges Netz aufzubauen, wenn dieses vorwiegend mit Wirkstrom belastet wird und der Leistungsbedarf möglichst konstant ist. Bei grösseren Änderungen der Belastung müssen gewisse Spannungsschwankungen in Kauf genommen werden, oder die Kapazitäten der Erregerkondensatoren sind der jeweiligen Belastung anzupassen. Die Spannungshaltung kann auch durch Sättigungsdrosseln oder durch eine höhere Drehzahl- bzw. Frequenzsteigerung mit der Belastung erreicht werden. Diese Bedingungen können nur erfüllt werden, wenn die Turbinendrehzahl durch eine passende Regeleinrichtung beeinflusst wird. Diese zusätzlichen Einrichtungen erhöhen aber die Investitionskosten, so dass die bessere Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Synchrongenerator in Frage gestellt wird.

1.5 Der Asynchrongenerator im Parallelbetrieb

Beim Parallelbetrieb wird der zur Magnetisierung notwendige Erregerstrom als Blindstrom vom taktgebenden Drehstromnetz geliefert. Dies setzt zum Beispiel voraus, dass ins gleiche Netz Synchrongeneratoren oder Phasenschieber arbeiten, die Blindleistung erzeugen können. Die Frequenz des Netzes wird durch die Synchrongeneratoren bestimmt. Die Statorwicklung des Asynchrongenerators wird ans Netz geschaltet und der Rotor, wie erwähnt ein Kurzschlussläufer, wird von der Turbine übersynchron angetrieben. Bei gegebener Spannung und Frequenz hängt die abgegebene Leistung nur vom Schlupf ab. Sie ist durch die Drehzahl der Turbine einzustellen, die nur wenige Prozente über der synchronen Drehzahl des Generators liegt.

Da bei Teillast der Leistungsfaktor stark abnimmt, wird der Asynchrongenerator vorteilhaft für annähernd konstante Leistung, das heisst Nennleistung, eingesetzt.

1.6 Betriebsverhalten der Drehstrom-Asynchronmaschine

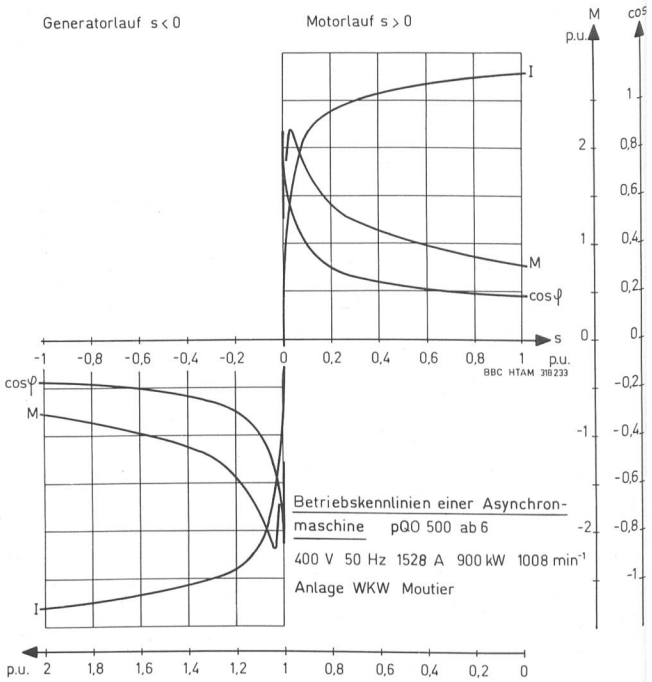


Bild 1. Die Betriebskennlinien zeigen die Änderungen des Drehmomentes, des Stromes und des Leistungsfaktors in Abhängigkeit vom Schlupf im motorischen und generatorischen Betrieb.

Nur bei einem bestimmten negativen Schlupf gibt die Asynchronmaschine ihre höchste elektrische Leistung im Generatorbetrieb ab. Wird dieser Schlupf über- oder unterschritten, so verringert sich die abgegebene Leistung sehr schnell.
Im Gegensatz zum Synchrongenerator ist der Asynchrongenerator im Kurzschluss mangels Erregung nicht in der Lage, einen Dauerkurzschlussstrom zu führen. Beim Parallelbetrieb mit einem Netz ist trotzdem ein Kurzschlussschutz erforderlich, da dieses auf den Kurzschluss im Netz des Asynchrongenerators arbeitet. Liegt der Kurzschluss innerhalb des Asynchrongenerators oder in seinem nächsten Bereich, muss der Generator vom Netz getrennt werden.
Ein Überspannungsschutz wird empfohlen, auch wenn der Erregerkondensator über einen Schalter mit dem Generator verbunden ist. Damit ist jede Gefahr der Selbsterregung beim Ansteigen der Turbinendrehzahl beseitigt. Dabei ist der Generatorschalter mit dem Kondensatorschalter so zu verriegeln, dass der Kondensator nur bei geschlossenem Generatorschalter auf den Asynchrongenerator geschaltet werden kann. Beim Öffnen des Generatorschalters ist der Kondensator gleichzeitig, oder besser kurz vorher, abzuschalten.
Bei Spannungsschwankungen im Netz reagiert der Asynchrongenerator mit einer Änderung des aufgenommenen Magnetisierungs-Blindstromes. Um den Generator bei zu grosser Überspannung gegen Überstrom zu sichern, ist ein entsprechender Überstromschutz zweckmässig.
Ein Absinken der Frequenz im Verbundnetz verursacht eine Erhöhung des Schlupfes bzw. Drehmomentes des Generators, weil sich dessen Drehzahl und damit die Wirkleistungsabgabe automatisch entsprechend der zur Verfügung stehenden Turbinenleistung einstellt. Um nun eine

solche Überbelastung durch Überstrom zu vermeiden, ist die Turbine mit einer Öffnungsbegrenzung auszurüsten, die die Turbinenleistung auf einen dem Generator entsprechenden Wert nach oben begrenzt.
Bei Erhöhung der Netzfrequenz und gleichbleibender Spannung wird zuerst der Asynchrongenerator und damit die Turbine entlastet. Bei unverändertem Wasserangebot resultiert daraus eine Drehzahlerhöhung der Turbine. Letztere gibt jedoch, infolge der fallenden Drehmomentcharakteristik, eine kleinere Leistung als vor der Frequenzerhöhung ab, wodurch keine Überlastung des Asynchrongenerators eintritt.

1.7 Mechanische Probleme

Prinzipiell können Asynchrongeneratoren in allen für Asynchronmotoren gleicher Grösse möglichen Bauformen, Schutz- und Kühlarten ausgeführt werden. Ob der Generator für waagrechte, senkrechte oder geneigte Aufstellung vorgesehen werden soll, entscheidet die Disposition der hydraulischen Maschine.
Von grosser Bedeutung für die Bauform ist die Art der Turbine und deren Lagerung. Werden zum Beispiel bei einer waagrechten Anordnung und Antrieb durch Peltonturbine, der Strahldruck von deren Lagerung übernommen oder bei Francis- und Kaplanturbinen deren axial wirkende Kräfte, kann für horizontale Aufstellung die Bauform IM B3 gewählt werden. Diese Bauform mit zwei Lagerschildern, Gehäuse mit Füssen und freiem Wellenende entspricht der bevorzugten genormten Ausführung der BBC-Asynchronmaschinen kleiner bis mittlerer Leistung (bis zirka 16000 kW bei 1000 min^{-1} und 12500 kW bei 750 min^{-1}). Die genormten Komponenten verringern die Kosten und die Lieferzeit der Maschine.
Bei kleineren Anlagen mit Kaplanturbinen wird der Generator vorwiegend über Drehzahlerhöhungsgetriebe angetrieben. Unter der Voraussetzung, dass auch hier der hydraulische Schub durch die Lagerung der Turbine, respektive des Getriebes übernommen wird, sind die Vorteile der Bauform IM B3 gegeben.
Bei Lastabwurf und gleichzeitigem Versagen der Turbinensteuerung kann die Turbine die Durchgangsdrehzahl erreichen. Diese beträgt bei Pelton- und Francisturbinen etwa das 1,8fache, bei Kaplanturbinen etwa das Dreifache der Nenndrehzahl. Dies hat zur Folge, dass auch der Asynchrongenerator für diese höchste Drehzahl ausgelegt sein muss.

1.8 Wasserpegelmessung und Turbinensteuerung

Wie bereits erwähnt, entspricht die Leistungsabgabe des Asynchrongenerators der Turbinenleistung und ist somit von der Netzbelastung unabhängig. Die Leistung der Turbine wird durch die zugeführte Wassermenge und deren Fallhöhe bestimmt.
Im Interesse einer maximalen Energieproduktion ist die Turbinenleistung dem jeweiligen Wasserangebot anzupassen. Mittels Schwimmkörper, Druckmessung (zum Beispiel Lufteinperlverfahren) oder einer anderen Technik, wird im Oberwasser die Staukote gemessen. Dem im Kraftwerk installierten Wasserstandsregler werden folgende Werte eingegeben:
- Istwert des Wasserstandes (zum Beispiel über NF-Übertragung)
- Sollwert des Wasserstandes (zum Beispiel nach vorgegebenem Programm)
- Istwert der Leistung des Asynchrongenerators (über Messumformer).

Die Solleistung der Turbine wird aus dem Vergleich von Soll- und Iststand in einem Regler mit PI-Verhalten ermittelt

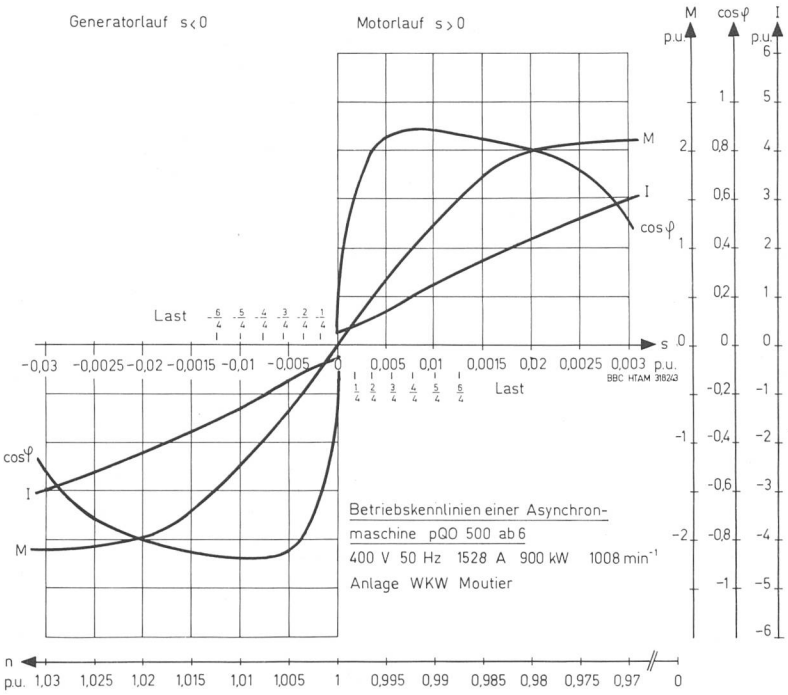


Bild 2 zeigt die Kennlinien zwischen der synchronen Drehzahl ($s = 0$, $n = 1$ pu $\equiv$ 1000 min^{-1}) und dem Kippschlupf ($s_k = \pm 0{,}031$ pu). Der dauernd ausnutzbare Bereich liegt zwischen Leerlauf und Nennlast ($\frac{4}{4}$Last). $\frac{5}{4}$- und $\frac{6}{4}$-Last können nur kurzzeitig genützt werden.

und mit dem Istwert der Generatorleistung dem Stellungsgeber (Dreipunktregler) zugeführt. Dieser erteilt dem Stellorgan der Turbine Auf/Zu-Befehle, bis Soll- und Istleistung übereinstimmen.
Eine Wasserstandsregelung ist vor allem auch dann erforderlich, wenn aufgrund vertraglicher Bestimmungen im Ober- und Unterwasser ein festgelegter Pegelstand eingehalten werden muss.
Anstelle der Wasserstandsmessung im Staubecken durch Schwimmkörper wird auch die Druckmessung direkt vor der Turbine für deren Steuerung angewandt. Diese Methode hat den Vorteil, dass alle hierfür notwendigen Geräte im Kraftwerk selbst installiert werden können. Damit entfallen gegenüber der Schwimmertechnik mögliche Beeinträchtigungen der Betriebssicherheit infolge Elementarereignissen. Die Kote des Stausees wird aufgrund des Wasserdruk-

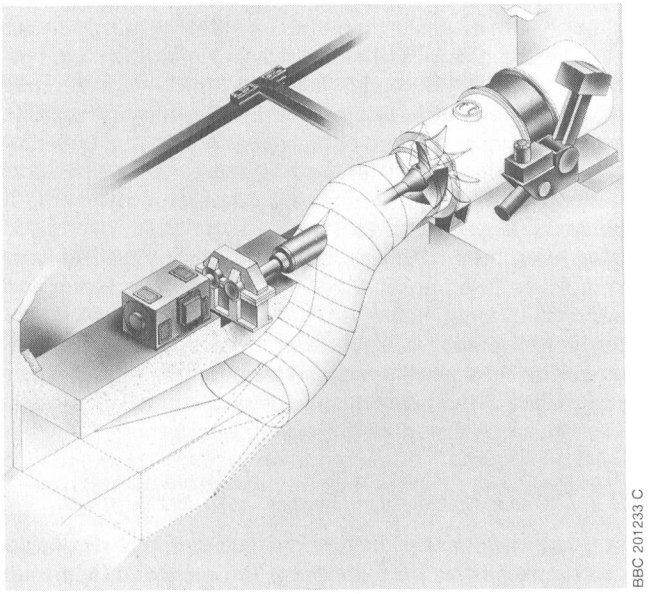


Bild 3. Beispiel einer horizontalen Anordnung für kleine Wasserkraftwerke: von rechts nach links: die Propellerrohrturbine, das Getriebe zur Drehzahlerhöhung, der Generator in der listenmässigen Bauform IM B3.

kes und einer von der Disposition der Anlage und der Leitapparatstellung abhängigen, nichtlinearen Funktion bestimmt. Diese Funktion erfasst die Druckverluste durch Geschwindigkeit und Reibung des Wassers in der Druckleitung. Hierfür werden Mikroprozessoren mit den eingespeicherten, zentralenabhängigen Parametern eingesetzt. Diese können zum Teil erst durch Versuche bei der Inbetriebsetzung ermittelt werden.

Um bei Störungen mechanischer Art (zum Beispiel Lagerschaden), bei möglichst kleinem Drehzahlanstieg, die Gruppe sofort abstellen zu können, wird automatisch der Schnellschluss betätigt und – sofern vorhanden – das Absperrorgan im Einlauf geschlossen. Der Generatorschalter wird nach Entlastung des Maschinensatzes geöffnet.

Bei Störungen elektrischer Art, die ein sofortiges Öffnen des Generatorschalters voraussetzen, sowie bei Lastabwurf, ist der Drehzahlanstieg möglichst rasch abzufangen. In solchen Fällen wird durch die entsprechenden Schutzrelais bzw. bei Überdrehzahl mittels Fliehkraftschalter oder elektronischem Drehzahl-Messsystem der Notschluss eingeleitet. Dieser löst folgende Funktionen aus:

- Bei Francis-, Propeller- und Kaplanturbinen die Schliessung des Leitapparates, bei Peltonturbinen das Einfallen des Strahlablenkers und das Schliessen der Düse
- Generatorschalter sofort öffnen (bei Lastabwurf bereits offen)
- Absperrorgan sofort schliessen (sofern vorhanden).

Wird beim Antrieb des Generators die Wasserzuführung der Turbine aus irgendwelchen Gründen unterbrochen und der Generator vom taktgebenden Netz nicht abgetrennt, so läuft der Generator als Motor. Er gibt mechanische Leistung ab, und zwar vor allem zur Deckung der mechanischen Verluste, wie Lager- und Luftreibungsverluste des Turbinenlaufrades usw. Um diesen Zustand über längere Zeit zu verhindern, ist ein Rückleistungsrelais zur Abschaltung des Generators über ein Verzögerungsglied vorzusehen.

Teil 2 Technischer Teil (Theorie)

2.1 Die Asynchronmaschine im motorischen und generatorischen Betrieb

Die Asynchronmaschine wird meistens als Motor betrieben, in welchem Falle der Rotor untersynchron gegenüber dem Drehfeld läuft, das heisst, mit einem positiven Schlupf. Als Motor nimmt die Maschine Wirk- und Blindleistung auf und gibt ein positives Moment ab. Wird der Rotor über eine synchrone Drehzahl durch ein äusseres Mittel – zum Beispiel eine Turbine – angetrieben, läuft die Asynchronmaschine als Generator mit einem negativen Schlupf, also übersynchron, das Moment an der Welle ist also negativ, eine Wirkleistung wird abgegeben und eine Blindleistung wird aufgenommen (Bilder 1 und 2).

Eine Asynchronmaschine funktioniert im I. Quadrant der komplexen Leistungsebene ($P > 0$, $P_q > 0$) als Motor und im IV. Quadrant ($P < 0$, $P_q > 0$) als Generator (Bild 4). Da die Asynchronmaschine keine Blindleistung für das magnetische Feld selber erzeugen kann, muss diese Blindleistung dem Netz oder im Inselbetrieb einem geeigneten Blindleistungserzeuger entnommen werden.

2.2 Die Blindleistung – Bedarf und Erzeugung

Um das magnetische Feld herzustellen, nimmt die Asynchronmaschine eine Blindleistung auf. Im Leerlauf ist sie am kleinsten und nimmt mit steigender Last (Motor oder Generator) zu (Bild 4).

Mit steigender Polzahl nimmt der Blindstrom gegenüber

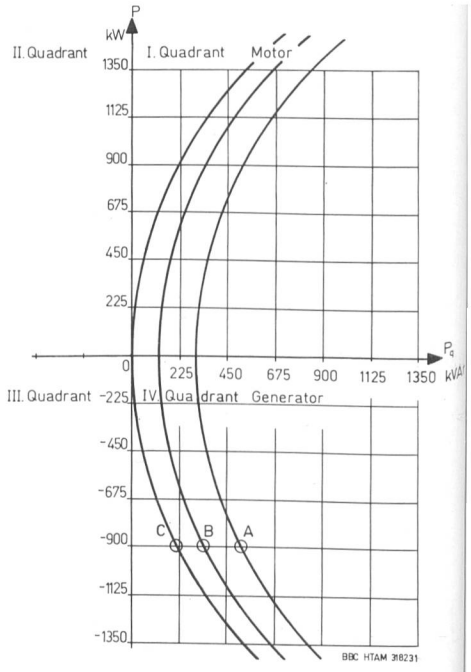


Bild 4. Kennlinie einer Asynchronmaschine, pQO 500 ab 6, 400 V, 50 Hz, 900 kW, 1008 min^{-1}. Anlage WKW Moutier. A Nennlastbetriebspunkt ohne Kompensation. B Nennstrombetriebspunkt mit Kompensation des linearen Anteils im Leerlauf. C Nennstrombetriebspunkt mit vollständiger Kompensation im Leerlauf.

dem gesamten Strom zu, was eine Verschlechterung des Leistungsfaktors ($\cos\varphi$), mit sich bringt.

Um den Leistungsfaktor zu verbessern, werden vorwiegend Kondensatoren verwendet. Kondensatoren geben eine Blindleistung ab. Daraus folgt, dass die Kennlinie in Bild 4 mehr oder weniger nach links verschoben wird. Bei vollständiger Kompensation im Leerlauf ($\cos\varphi_0 = 1$) verschiebt sich die Kennlinie auf die reelle Achse.

Im Leerlauf besteht der Blindstrom, der sogenannte Magnetisierungsstrom, aus zwei Teilen:

- $I_{m\delta}$ ist linear zur Spannung und entspricht der Durchflutung im Luftspalt;
- I_{mfe} ist nicht linear zur Spannung und entspricht der Durchflutung im Eisen. Die Nichtlinearität ist bedingt durch die Sättigung des Eisens.

2.3 Kriterium der Selbsterregung

Werden Kondensatoren zum Blindstrombezug vorgesehen, so ist mit Rücksicht auf eine mögliche Selbsterregung des Generators zu untersuchen, ob zwischen Kondensator und Asynchrongenerator ein Schaltorgan vorzusehen ist.

Eine angetriebene Asynchronmaschine hat die Eigenschaft, sich bei einer bestimmten Frequenz und bei Parallelschalten eines passend gewählten Kondensators auf eine im Sättigungsgebiet ihrer Magnetisierungskennlinie liegende Leerlaufspannung zu erregen. Die zum Einleiten dieser Selbsterregung erforderliche Remanenzspannung ist in der Asynchronmaschine im allgemeinen vorhanden. Das Kriterium für ein Zustandekommen der Selbsterregung liefert die Magnetisierungskennlinie einer Asynchronmaschine. Trägt man den Magnetisierungsstrom I_m als Funktion der Klemmenspannung U auf, so erhält man die Magnetisierungskurve. In diesem Diagramm zeichnet man die Kennlinie des Kondensators $I_c = U\omega_n C$ ein (C = Kapazität in Farad, $\omega_n = 2\pi f_n$, I_c = Kondensatorstrom in A, f_n = Nennfrequenz in Hz).

Da ω und C bei einer bestimmten Drehzahl konstant sind, ist die Kondensatorkennlinie eine Gerade.

Selbsterregung ist dann zu erwarten, wenn die Kondensatorkennlinie die Magnetisierungskurve schneidet. Der Schnittpunkt gibt dabei diejenige Spannung an, die am Ende des Selbsterregungsvorganges zu erwarten ist.

Es tritt Selbsterregung auf, wenn

$$\frac{dI_c}{dU} > \frac{dI_m}{dU} \quad \Big| \; f = \text{konstant} \qquad I_m \to 0.$$

Diese Ungleichung gilt im linearen Bereich des Magnetisierungsstromes I_m.

In Bild 6 ist die Magnetisierungskurve eines Asynchrongenerators 900 kW, 400 V, 50 Hz, 1008 min^{-1} sowie die Kennlinie für zwei verschiedene Kondensatorgrössen bzw. Kondensatorströme dargestellt. In unserem Beispiel kompensiert der Kondensatorstrom I_{c2} (50 Hz) nur den linearen Anteil im Leerlauf; dagegen ist I_{c3} (50 Hz) für die vollständige Blindleistungskompensation im Leerlauf ausgelegt.

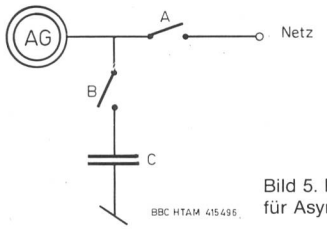


Bild 5. Kondensatorkompensation für Asynchronmaschine.

Arbeitet nun der vorgenannte, im Leerlauf vollständig kompensierte Asynchrongenerator im Sinne des Bildes 5 im Parallelbetrieb auf ein Netz, sind Spannung und Frequenz durch dieses gegeben. Aus Bild 6 ist ersichtlich, dass die Kondensatorkennlinie I_{c3} (50 Hz) die Magnetisierungskurve I_m (50 Hz) im Betriebspunkt c schneidet und damit in die Gefahrenzone der Selbsterregung gerät.

Da der Asynchrongenerator bei einer Lastabschaltung mit seiner Drehzahl auf die Durchgangsdrehzahl der Turbine ansteigen kann, muss dieser Betriebsfall als Kriterium der Selbsterregung zugrunde gelegt werden. Bei der Bestimmung der Kondensatorkennlinie ist also die entsprechend der Durchgangsdrehzahl n_d erhöhte Frequenz zu berücksichtigen.

$$I_{cd} = U\omega_n \frac{n_d}{n_n} C$$

Ausserdem ist die Magnetisierungskurve entsprechend der erhöhten Drehzahl zu bestimmen.

Die Gefahr von Überspannungen bei Selbsterregung wird an folgendem Beispiel aufgezeigt. Angenommen der Asynchrongenerator mit den unter Figur 5 erwähnten Daten – mit vollständiger Leerlaufkompensation – arbeitet in das Netz. Aus irgendwelchen Gründen fällt der Generatorschalter A (Figur 4) aus. Der Asynchrongenerator wird durch die Turbine beschleunigt, und die Frequenz steigt.

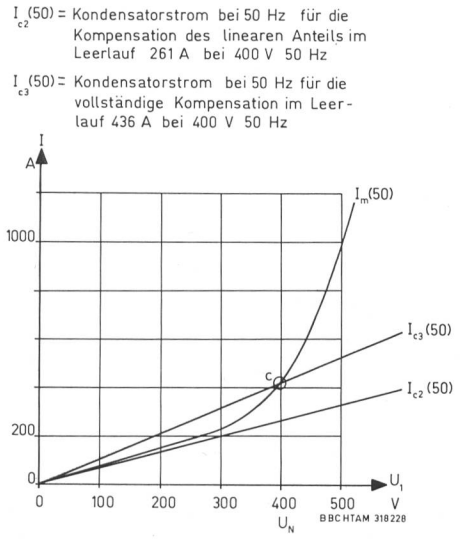


Bild 6. Leerlaufcharakteristiken Asynchrongenerator, pQO 500 ab 6, 400V, 50 Hz, 900 kW, 1008 min^{-1}. Anlage WKW Moutier.

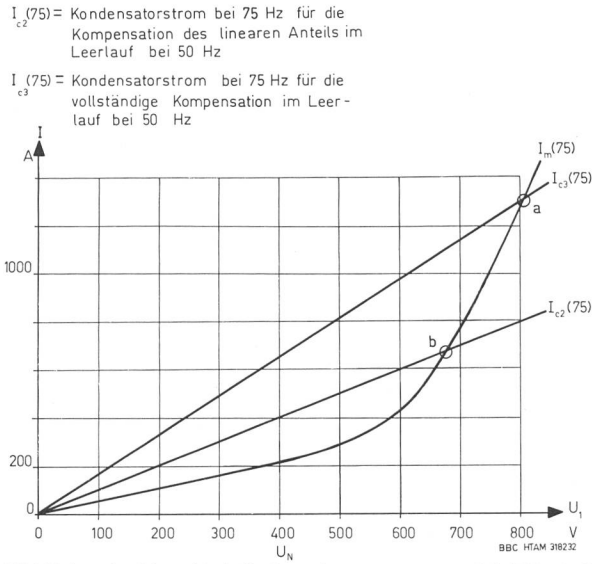


Bild 7. Leerlaufcharakteristik Asynchrongenerator, pQO 500 ab 6 bei 75Hz.

Die Überdrehzahl betrage 1,5·Nenndrehzahl, welche 75 Hz entspricht. Der Strom I_{c3} steigt – die Neigung der Kondensatorkennlinie I_c bei 75 Hz ist 1,5mal grösser als bei 50 Hz – bis die Magnetisierungskennlinie I_m (75) sich mit derjenigen I_{c3} (75) im Punkt a schneidet (Bild 7).

Die erzeugte Blindleistung in den Kondensatoren muss durch die Maschine aufgenommen werden, die Spannung steigt bis ein Gleichgewicht stattfindet. Im vorliegenden Fall erreicht die Klemmenspannung U zirka 820 V, was etwa dem 2,05fachen Wert der Nennspannung entspricht. Das Überspannungsverhältnis ist grösser als das Überdrehzahlverhältnis. Durch die auftretenden Überspannungen können Wicklungen und Kondensatoren beschädigt oder sogar zerstört werden. Im erwähnten Beispiel ist es unumgänglich, dass die Kondensatoren vom Generator getrennt werden, sobald der Generatorschalter geöffnet wird.

Selbst wenn nur der lineare Anteil des Magnetisierungsstromes kompensiert wird (Teilkompensation) besteht bei Drehzahlen höher als die Nenndrehzahl die Gefahr der Selbsterregung (siehe Bild 7, Punkt b U = 675 V).

Für überschlägige Ermittlungen ist es ausreichend, im linearen Bereich der Magnetisierungskennlinie für die Nenndrehzahl die jeweiligen Ordinatenwerte (I_m) entsprechend dem Verhältnis n_n/n_d zu verkleinern. Man erhält dann den neuen Anstieg des Magnetisierungsstromes und kann feststellen, inwieweit eine Selbsterregung bei diesem Betriebsfall eintritt.

Ist eine Selbsterregung durch den parallelgeschalteten Kondensator bei sämtlichen Betriebszuständen (einschliesslich der Durchgangsdrehzahl) ausgeschlossen, so kann der Kondensator unmittelbar (nicht abschaltbar) mit dem Asynchrongenerator verbunden werden.

Besteht dagegen die Gefahr einer Selbsterregung, so ist der Kondensator auf alle Fälle über einen entsprechend ausgewählten Schalter mit dem Asynchrongenerator zu verbinden. Zur Sicherstellung, dass der Generator bei abgeschaltetem Kondensator hochfährt und mit dem Netz parallel geschaltet wird, ist eine entsprechende Verriegelung zwischen Generatorschalter und Kondensatorschalter zweckmässig.

Diese Verriegelung wird dabei so festgelegt, dass der Kondensator nur bei geschlossenem Generatorschalter auf den Asynchrongenerator geschaltet werden kann. Beim Öffnen des Generatorschalters wird gleichzeitig, oder besser kurz vorher, der Kondensator abgeschaltet.

$I_{c2}(40)$ = Kondensatorstrom bei 40 Hz für die Kompensation des linearen Anteils im Leerlauf bei 50 Hz

$I_{c3}(40)$ = Kondensatorstrom bei 40 Hz für die vollständige Kompensation im Leerlauf bei 50 Hz

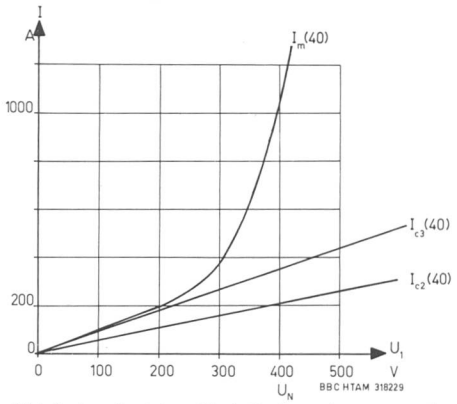


Bild 8. Leerlaufcharakteristik Asynchrongenerator, pQO 500 ab 6 bei 40 Hz.

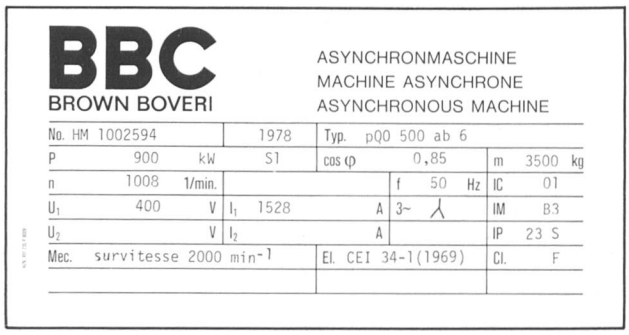
2.4 Folgen der Frequenzabsenkung bei Inselbetrieb

Bei Inselbetrieb ausschliesslich mit Asynchrongeneratoren muss beachtet werden, dass die Drehzahl bzw. Frequenz nicht unter eine gewisse Grenze fällt. Der Asynchrongenerator, welcher der Grafik Bild 6 entspricht, mit Kondensatoren für vollständige Kompensation bei 50 Hz, kann bei einer Drehzahl von 800 min^{-1} bzw. einer Frequenz von 40 Hz keine Spannung mehr erzeugen. In Bild 8 haben die Magnetisierungskurve I_m (40) und die Kondensatorkennlinie I_{c3} (40) keinen gemeinsamen Punkt.

Teil 3 Beispiele ausgeführter Anlagen

3.1 Umbau Wasserkraftwerk Moutier

In Moutier (Kanton Bern, Schweiz) wurden in einem alten Kraftwerk zwei Synchrongeneratoren mit einer Gesamtleistung von 450 kW durch einen Drehstrom-Asynchrongenerator 900 kW, 400 V, 1008 min^{-1}, 50 Hz, Bauform IM B3 ersetzt. Antrieb durch Francisturbine mit eigener Lagerung. Der Generator liefert über Transformator 400/16000 V Grundlastenergie in das Mittelspannungs-Verbundnetz der Services Industriels de Moutier. Entscheidend für die Wahl des Asynchrongenerators waren die einfachere Turbinenregelung, Entfallen der Einrichtungen für Spannungsregelung und Synchronisierung, geringer Aufwand an Schutz- und Messgeräten sowie günstiger Preis. Die verfügbare mittlere Leistung beträgt 70% der Nennleistung über die Zeitperiode eines Jahres, das heisst 5520000 kWh.



BBC
BROWN BOVERI

ASYNCHRONMASCHINE
MACHINE ASYNCHRONE
ASYNCHRONOUS MACHINE

No. HM 1002594			1978	Typ. pQO 500 ab 6			
P	900	kW	S1	cos φ	0,85	m	3500 kg
n	1008	1/min.		f	50 Hz	IC	01
U_1	400	V	I_1 1528	A	3~ ⅄	IM	B3
U_2		V	I_2	A		IP	23 S
Mec. survitesse 2000 min^{-1}				El. CEI 34-1(1969)		Cl.	F

Bild 9. Leistungsschild des Asynchrongenerators im Wasserkraftwerk Moutier. Gemäss Vorschriften des Internationalen Elektrotechnischen Komitees muss die Durchgangsdrehzahl auf dem Leistungsschild vermerkt werden. Eine Maschine, die mit einer Wasserturbine gekuppelt ist, muss mechanisch für die Durchgangsdrehzahl ausgelegt werden.

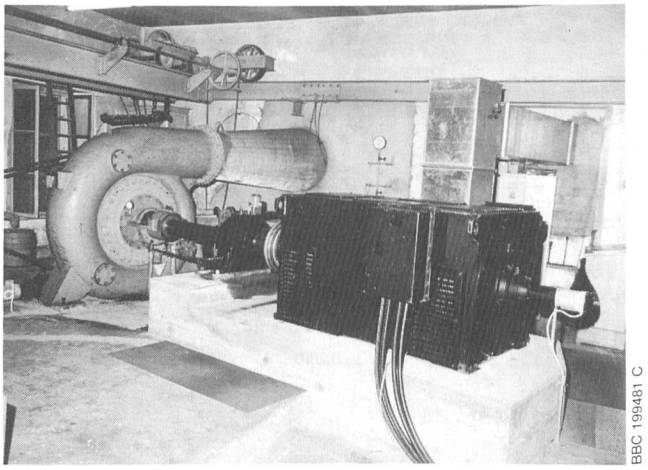


Bild 10. Wasserkraftwerk Moutier. Links die Francisturbine, welche den rechtsstehenden Asynchrongenerator pQO 500 ab 6 in der Bauform IM B3 antreibt. Schutzart IP 23. Daten des Generators: U_n = 400 V, f_n = 50 Hz, n_n = 1008 min^{-1}, P_n = 900 kW, $\cos\varphi_n$ = 0,85, Durchgangsdrehzahl = 2000 min^{-1}. Hinter dem Generator befindet sich der Abluftkanal. Die Warmluft heizt mittels Wärmeaustauscher eine Dienstwohnung im selben Gebäude (Verlustleistung 10...30 kW bei $\frac{1}{4}$...$\frac{4}{4}$-Last). Inbetriebnahme: 1979.

3.2 Umbau Wasserkraftwerk Manegg

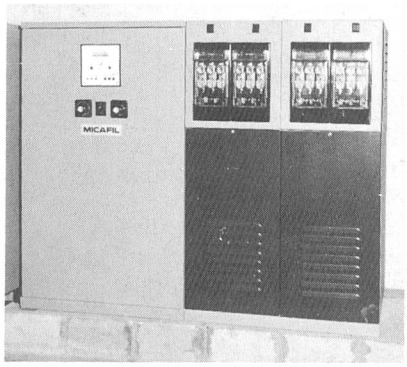
Im Kraftwerk Manegg der Zürcher Papierfabrik an der Sihl wurden 1980 die in den Jahren 1904 und 1916 installierten hydroelektrischen Gruppen mit Synchrongeneratoren durch zwei Drehstrom-Asynchrongeneratoren mit je 315 kW, 500 V, 610 min^{-1}, 50 Hz ersetzt. Mittels Kondensatoren wird der Leistungsfaktor der Generatoren auf 0,92 angehoben. Jeder Generator in Bauform IM V1 ist direkt mit der vertikalen Kaplanturbine gekuppelt. Alle Axialkräfte der Turbine werden von deren Lager aufgenommen.
Der bessere Wirkungsgrad der Gruppe, speziell der hydraulischen Maschine, erlaubt bei gleichen Wasserverhältnissen eine bedeutende Erhöhung der nutzbaren Energie. Die Anlage arbeitet über Transformator 500/11000 V im Verbundbetrieb mit dem EW der Stadt Zürich und deckt vor allem die Bedürfnisse der Papierfabrik.

3.3 Wasserkraftwerk Lessoc

Das Kraftwerk Lessoc der Entreprises Electriques Fribourgeoises (EEF) nutzt das Wasser der Sarine. Das Maschinenhaus ist in der Staumauer integriert. Ausser einem Drehstrom-Synchrongenerator 1775 kVA, $\cos\varphi$ = 0,8 übererregt mit regulierter Francisturbine, für die Ausnützung der Pflichtwassermenge, sind in diesem Werk zwei weitere Maschinengruppen installiert. Diese bestehen aus Rohrturbine (Propellerturbine) und Drehstrom-Asynchrongenerator 3200 kW, 6600 V, 428 min^{-1}, 50 Hz, wobei der Generator mit horizontaler Welle ausserhalb der Wasserströmung angeordnet ist. Diese Gruppen sind nicht regelbar, werden speziell bei Hochwasser oder für die Erzeugung von Spitzenenergie eingesetzt. Bei Nennlast des Asynchrongenerators resultiert ein $\cos\varphi$ von 0,82, welcher mittels Kondensatoren auf 0,92 kompensiert wird. Das Kraftwerk wird mittels Hochfrequenz aus dem benachbarten Werk Broc oder Montbovon ferngesteuert.

3.4 Dotier-Wasserkraftwerk Bärenburg

Am Fusse der Staumauer des Ausgleichsbeckens Bärenburg der Kraftwerke Hinterrhein AG, Thusis, ist eine Dotiergruppe eingebaut zur Nutzung des Gefälles von 30 bis 50 m. Die Gruppe ist seit 1968 in Betrieb und setzt sich zusammen aus einer horizontalachsigen Francisturbine mit kombiniertem Längs- und Querlager, direkt geflanscht mit einem



BBC 199482 C

Bild 11. Wasserkraftwerk Moutier. Einer der beiden Schränke für automatisch gesteuerte Kondensatorbatterien zu 200 kVAr, Fabrikation Micafil, eine BBC-Tochtergesellschaft. Insgesamt stehen acht Stufen zur Verfügung. Auf diese Art wird verhindert, dass bei Teillast überkompensiert wird. Bei Vollast des Generators – 900 kW – wird der Leistungsfaktor von 0,85 auf 0,98 erhöht.

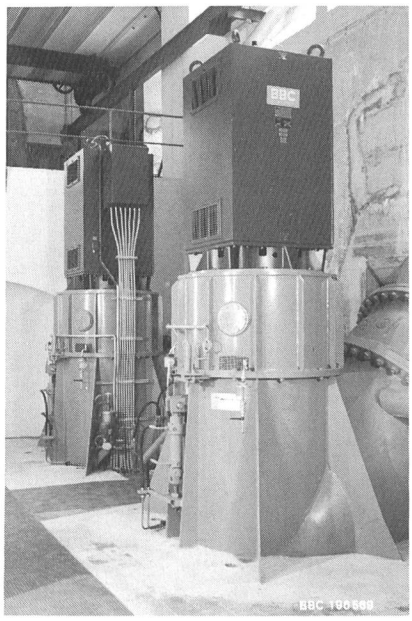


Bild 12. Wasserkraftwerk Manegg der Papierfabrik Sihl. Zwei vertikale Asynchrongeneratoren Typ gQOVx 450 bb 10, Bauform IM V1, jeder gekuppelt mit einer Kaplanturbine. Nenndaten (für eine Maschine): U_n = 500 V, P_n = 315 kW, $\cos\varphi_n$ = 0,82, n_n = 610 min^{-1}, Überdrehzahl = 1310 min^{-1}. Inbetriebnahme 1981.

Drehstrom-Asynchrongenerator der Bauform IM 1205. Der Generator ist für folgende Daten gebaut: 720 kW, $\cos\varphi$ = 0,86, 380 V, 611 (1160) min^{-1}, 50 Hz, und ist mit Tachometerdynamo sowie Fliehkraftschalter ausgerüstet. Da in vorliegendem Fall die Pflichtwassermenge je nach Jahreszeit sehr unterschiedlich ist und damit auch die Leistung der Turbine bzw. des Generators, werden die für die Verbesserung des Leistungsfaktors vorgesehenen Kondensatoren stufenweise und automatisch zugeschaltet, um eine unnötige Überkompensation zu verhindern. Der Generator arbeitet in Blockschaltung in das 16-kV-Talnetz.

3.5 Pumpturbinenanlage Busko Blato in Jugoslawien

Die Hauptaufgabe der Pumpstation Busko Blato (Jugoslawien) ist die Förderung der überschüssigen Wassermenge, welche im Wasserkraftwerk Orlovac nicht verarbeitet werden kann, vom Ausgleichsbecken Lipa in den etwas höher gelegenen Stausee Busko Blato. Während der niederschlagsarmen Jahreszeiten wird das im Ausgleichsbecken fehlende Wasser dem Stausee entnommen. Dieses Wasser wird bei genügendem Niveauunterschied zwischen dem Stausee und dem Ausgleichsbecken in der Anlage Busko Blato genutzt und die dadurch erzeugte elektrische Energie in das regionale Netz gespeist. Während einer längeren Trockenperiode kann der Wasserstand des Stausees niedriger sein als derjenige des Ausgleichsbeckens, so dass das Wasser reversibel vom Stausee in das Ausgleichsbecken gepumpt werden muss.

In der Pumpstation sind drei Pumpturbinen für Pumpbetriebe in zwei Richtungen und Turbinenbetrieb in einer Fliessrichtung installiert. Im Interesse einer optimalen Anpassung an die vorhandenen hydraulischen Verhältnisse wurden als Antrieb polumschaltbare Drehstrom-Asynchronmotor-Generatoren mit Käfiganker für zwei Drehzahlen (reversibel) gewählt. Deren Daten lauten: 3400/1600 kW als Motor, 3500/1670 kW als Generator, 6000 V, Synchrondrehzahlen 1000/750 min^{-1}, 50 Hz, Anlauf direkt. Die Motor-Generatoren entsprechen der Bauform IM 7311; sie wurden im Jahre 1973 in Betrieb gesetzt.

3.6 Umbau Wasserkraftwerk Landquart

In der Stufe I des Kraftwerkes Landquart der Papierfabriken Landquart wurden 1977 die zwei alten hydroelektrischen Gruppen durch leistungsfähigere ersetzt. Mit Rücksicht auf die Kosten des Umbaues wurde die ursprüngliche hydraulische Disposition beibehalten (Francisturbine horizontalachsig im Oberwasserkanal, ohne Spiralgehäuse, mit vertikalem Saugrohr).

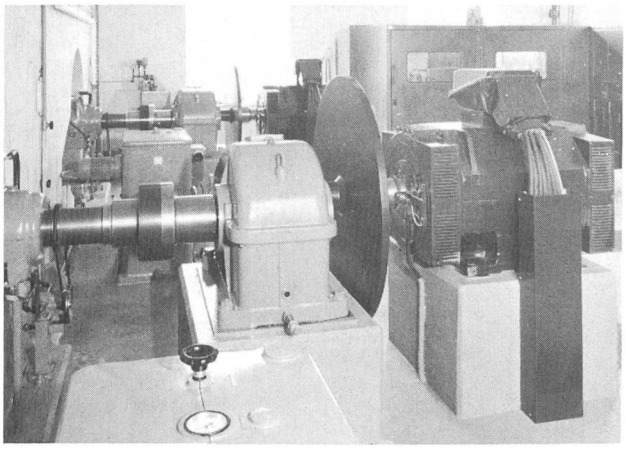
Durch den Parallelbetrieb dieses Werkes mit dem Netz der AG Bündner Kraftwerke, Klosters, hat der Inselbetrieb an Bedeutung verloren. Es ist dies mit ein Grund, weshalb bei den neuen Gruppen anstelle des Synchrongenerators ein Asynchrongenerator gewählt wurde. Im Interesse einer wirtschaftlichen Generatordrehzahl wird er über ein Drehzahlerhöhungsgetriebe angetrieben.

Jede Gruppe besteht aus einer Francisturbine einfacher Bauart, antriebseitig mit einem kombinierten Längs- und Querlager, Stirnradgetriebe (250/1015 min^{-1}), Schwungrad und Asynchrongenerator mit Käfiganker (Bauform IM B3, Schutzart IP 23, Kühlart IC 01).

Generatordaten: 250 kW, 400 V, 361 A, 1015 min^{-1}, 50 Hz. Die beiden Generatoren arbeiten auf einer gemeinsamen Schiene, an welcher auch die Kondensatoren über Schalter angeschlossen sind. Bei gleichzeitigem Betrieb beider Generatoren mit Nennlast verbessern die Kondensatoren den $\cos\varphi$ von 0,83 auf 0,94.

Beim Start wird der Generator durch die Turbine auf annähernd synchrone Drehzahl gefahren und zwecks Reduktion des Einschaltstromstosses über Vorwiderstände dem 380-V-Netz zugeschaltet.

Durch die ursprüngliche hydraulische Disposition und die zulässige Schwallwasserhöhe ergibt sich bei Notschluss der Turbine eine lange Schliesszeit für den Leitapparat. Um trotzdem den Drehzahlanstieg der Gruppe in vernünftigen Grenzen halten zu können, wurde auf das schnellaufende Wellenende des Getriebes ein Schwungrad aufgesetzt.



BBC 188039 C

Bild 13. Wasserkraftwerk Landquart I der Papierfabriken Landquart. Zwei horizontale Asynchrongeneratoren Typ QO 355 M 6, Bauform IM B3, Antrieb durch Francisturbine über Getriebe. Nenndaten (für eine Maschine): U_n = 400 V, P_n = 250 kW, $\cos\varphi_n$ = 0,83 n_n = 1015 min^{-1}, Überdrehzahl = 2250 min^{-1}. Inbetriebnahme 1977.

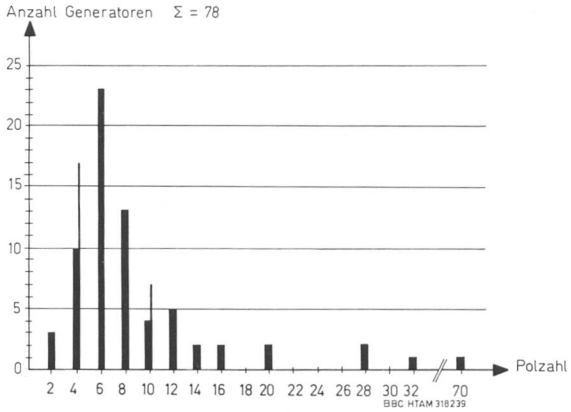


Bild 14. Anzahl der Asynchrongeneratoren in Funktion der Polzahl in der Schweiz, Stand 31. Dezember 1980.

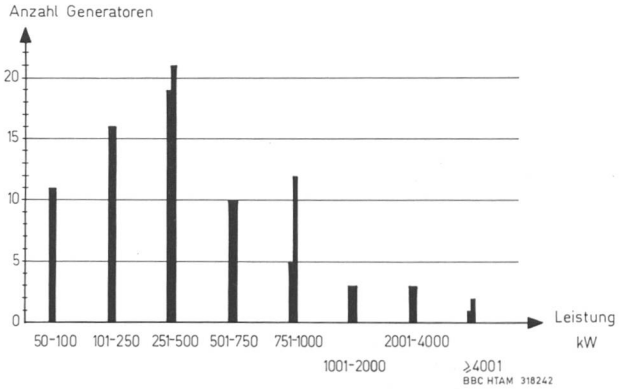


Bild 15. Anzahl der Asynchrongeneratoren in Funktion der Leistung in der Schweiz, Stand 31. Dezember 1980.

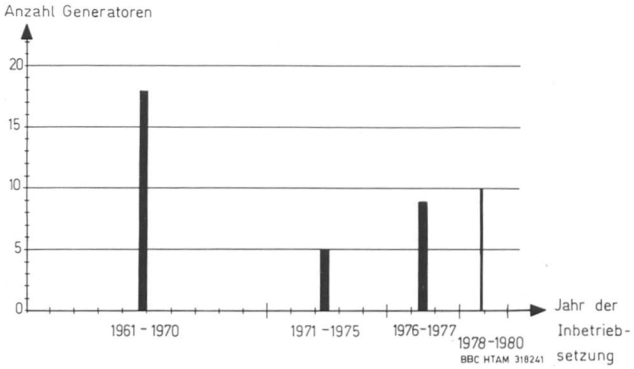


Bild 16. Anzahl der Asynchrongeneratoren in Funktion des Inbetriebsetzungsjahres in der Schweiz im Zeitabschnitt 1961 bis 1980.

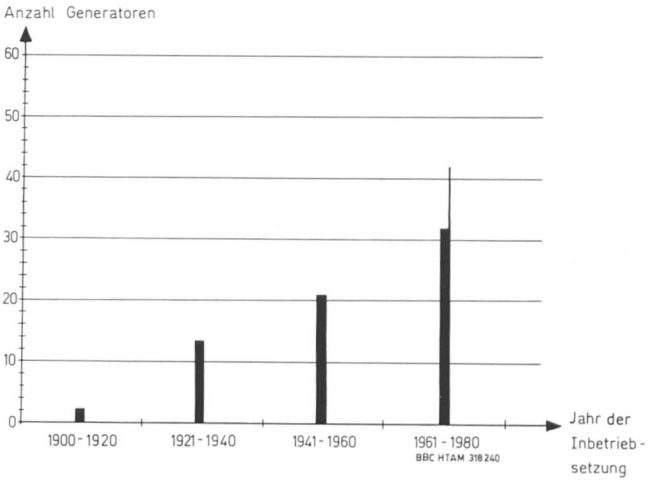


Bild 17. Anzahl der Asynchrongeneratoren in Funktion des Inbetriebsetzungsjahres in der Schweiz im Zeitabschnitt 1900 bis 1980.

3.7 Wasserkraftwerk Muslen

Das Wasserkraftwerk Muslen der St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerke AG, das am nordseitigen Ufer des Walensees gebaut wurde, konnte im Frühjahr 1982 den Betrieb aufnehmen.

Die hydroelektrische Gruppe besteht aus einer einlagerigen Francisturbine, direkt über Klemm-Schwungrad gekuppelt mit einem Asynchrongenerator mit Käfiganker, Bauform IM B3. Dessen Daten lauten: 1580 kW, 480 V, 2144 A, 1510 (2650) min^{-1}, 50 Hz. Eine dem Generator zugeordnete Kondensatorbatterie von 418 kVAr erhöht den Leistungsfaktor bei Nennlast von 0,89 auf 0,97. Der Generator arbeitet in Blockschaltung über einen Transformator in das 16-kV-Mittelspannungsnetz der SAK.

Mit Rücksicht auf die Auslegung der Statorwicklung konnte für die genannte Leistung und Polzahl die Maschinenspannung nicht mehr im Rahmen der üblichen Niederspannungen ($U \leqslant 660$ V) frei gewählt werden. Als Ergebnis einer optimalen Auslegung des Generators, wurde in vorliegendem Fall dessen Spannung auf 480 V festgelegt. Diese Abweichung ist aber bei reiner Blockschaltung ohne weiteres zulässig.

Abschliessend noch ein Beispiel eines interessanten Kraftwerk-Umbaues mit Drehstrom-Synchrongenerator:

3.8 Umbau Wasserkraftwerk Kappelerhof

Das 1892 erbaute Limmatkraftwerk Kappelerhof wurde 1974 erneuert, wobei das Nutzgefälle mittels Ausbaggerung des unterwasserseitigen Flussbettes und die Ausbauwassermenge von 40 auf 60 m^3/s erhöht wurden. Eingehende Studien ergaben, dass ein Umbau des bestehenden, sehr alten Maschinenhauses mit seinen vier historischen Maschinengruppen aus dem Jahre 1925 (4 × 400 kVA, 4 kV, 214 min^{-1}, 50 Hz) nicht mehr sinnvoll war. Sie führten in diesem Fall als wirtschaftlichste Lösung zur interessanten Anordnung einer Kaplan-Rohrturbine in S-Form mit schräger Achse. Das Drehzahlerhöhungsgetriebe (86,3/750 min^{-1}) sowie der Generator sind ausserhalb der Wasserströmung aufgestellt.

Das Kraftwerk Kappelerhof ist zusammen mit dem benachbarten Kraftwerk Aue in der Lage, in gewissen Fällen im Inselbetrieb wichtige Verbraucher im Netz der Städtischen Werke Baden mit Energie zu versorgen. Es wurde deshalb ein Drehstrom-Synchrongenerator mit vergrössertem Schwungmoment gewählt, mit den Daten 3300 kVA, $\cos\varphi = 0{,}8$, 8000 V, 750 (2607) min^{-1}, 50 Hz, mit Wechselstromerreger, Bauform IM 7312. Diese Anlage ist mit moderner Anfahr- und Abstellautomatik, Fernbedienung und Fernüberwachung sowie einer vom Oberwasserniveau abhängigen Steuerautomatik ausgerüstet.

3.9 Statistische Erfassung der Asynchrongeneratoren in der Schweiz

Die Ende 1978 bei den Mitgliedern des Verbandes Schweizerischer Elektritzitätswerke, VSE, durchgeführte Umfrage über die Anzahl der in kleinen Wasserkraftwerken installierten Asynchrongeneratoren hat ein Gesamttotal von 68 Stück ergeben. Nach unseren Informationen wurden seit 1978 bis Ende 1980 weitere 10 Asynchrongeneratoren in Betrieb gesetzt, die in Bild 14 bis 17 mit dünnen Strichen dargestellt sind. Es geht daraus hervor, dass die Polzahl bei 68 von 78 Generatoren zwischen 2 und 12 (synchron 3000 und 500 min^{-1} bei 50 Hz) variiert, das heisst, 87% arbeiten innerhalb dieser Grenzen.

Über die Anzahl der Asynchrongeneratoren, die in der Schweiz in den Jahren 1900 bis 1980 in Betrieb gesetzt wur-

den, orientiert Bild 17. Es geht daraus hervor, dass die Vorteile der Asynchrongeneratoren für bestimmte Betriebsarten immer häufiger erkannt werden. Die Zunahme der Inbetriebsetzungen in den letzten 20 Jahren illustriert Bild 16. Die Leistungsbereiche der in der Schweiz installierten Asynchrongeneratoren (Stand Ende 1980) sind in Bild 15 dargestellt.

Ende 1978 standen in der Schweiz 68 Asynchrongeneratoren in Betrieb mit einer Gesamtleistung von 42100 kW. Der grösste Asynchrongenerator 6800 kW, 16 kV, 1507 min^{-1}, 50 Hz wurde 1971 im Wasserkraftwerk Ackersand in Betrieb genommen. Ein noch grösserer Asynchrongenerator mit den Daten 8400 kW, 10,5 kV, 50 Hz, 10polig wurde 1979 im erweiterten Wasserkraftwerk Gondo installiert. Ende 1980 waren in der Schweiz 78 Asynchronmaschinen mit einer Gesamtleistung von 57080 kW installiert, wovon 24 Stück ab 1971 in Betrieb gesetzt wurden.

Teil 4 Zusammenfassung

4.1 Gegenüberstellung der Eigenschaften und des Betriebsverhaltens von Asynchron- und Synchrongeneratoren

Asynchrongeneratoren (AG)	*Synchrongeneratoren (SG)*
– Mechanisch sehr robust praktisch wartungsfrei	– Mechanisch robust mit bürstenlosem Wechselstromerreger praktisch wartungsfrei
– keine besonderen Forderungen hinsichtlich Massenträgheitsmoment	– gegeben durch die hydraulischen Verhältnisse ist eine minimale Schwungmasse für die Drehzahlregelung und Begrenzung der Abschaltdrehzahl erforderlich
– kleiner Luftspalt, muss in gewissen Fällen infolge Überdrehzahl aus mechanischen Gründen vergrössert werden, beeinträchtigt den Leistungsfaktor	– die Überdrehzahl ist nur durch mechanische Beanspruchung begrenzt
– bei gleicher Leistung ist der AG gegenüber dem SG vorteilhafter bezüglich Masse, Platzbedarf und Wirtschaftlichkeit	
– benötigt für seine Erregung Blindleistung aus Netz oder Kondensatoren. Mit zunehmender Polzahl bzw. kleinerer Drehzahl fällt der Leistungsfaktor	– kann Blindleistung abgeben oder beziehen
– bei grösseren Belastungsänderungen im Inselbetrieb müssen für die Spannungshaltung regelbare Kondensatoren oder Sättigungsdrosseln vorgesehen werden	– die Spannungshaltung erfolgt problemlos mit der Erregung über Spannungsregler
– $P_q = f(P)$, das heisst, die Charakteristik ist eine Kurve (Abschnitt 2.1, Bild 4). Bei Parallelbetrieb kann die Blindleistung (P_q) vom Netz bezogen werden oder von einem SG im selben Werk. Man kann auch eine Teilkompensation vorsehen, wobei nur der lineare Anteil der magnetischen Durchflutung mit Kondensatoren kompensiert wird	– der Betriebspunkt $<P$; $P_q>$ ist beliebig einstellbar im Rahmen der thermischen und elektrischen Grenzen des Generators und des Erregers, das heisst, die Charakteristik ist eine Fläche
– Kondensatoren benötigen einen Überspannungsschutz	
– braucht kein Synchronisiergerät	– braucht ein Synchronisiergerät bei Parallelbetrieb
– Hochfahren der Turbine mit dem Generator auf annähernd synchrone Drehzahl und Netzschalter schliessen.	– Hochfahren der Turbine mit dem Generator auf synchrone Drehzahl, synchronisieren und belasten
	– im Inselbetrieb ist Frequenzregelung möglich.

4.2 Der Einsatz von Asynchron- und Synchrongeneratoren unter Berücksichtigung der Betriebsart (tabellarische Zusammenstellung)

Die gekreuzten Felder verweisen auf die entsprechende Eignung

Art des Generators	Eignung	Parallelbetrieb				Inselbetrieb			
		a	b	c	d	a	b	c	d
Asynchron	sehr geeignet	x							
	geeignet		x						
	nicht besonders geeignet					x			
	ungeeignet			x	x		x	x	x
Synchron	sehr geeignet	x	x	x	x	x	x	x	x

a Betrieb mit konstanter Leistung
b Betrieb mit veränderlicher Leistung
c Betrieb mit veränderlicher Last und Spannungshaltung
d Betrieb mit veränderlicher Last und Blindleistungserzeugung

Die elektrischen Eigenschaften und wirtschaftlichen Vorteile des Asynchrongenerators werden bei Parallelbetrieb a und b am besten ausgenützt (Bilder 18 bis 21).

4.3 Schlussfolgerung

Die Verknappung und Verteuerung der Energie machen heute kleine Kraftwerke (Leistungsbereich 10000 bis 20000 kW) aktueller und wirtschaftlicher. Das Kleinkraftwerk mit dem robusten Asynchrongenerator ist mit den, trotz Kompensationskondensatoren, günstigeren Anlagekosten gegenüber Kraftwerken mit Synchrongeneratoren konkurrenzfähig. Der geeignetste Fall für den Einsatz eines Asynchrongenerators ist der Verbundbetrieb, wo die Blindleistungszufuhr kein Problem bietet (kurze Speiseleitung oder Synchrongenerator in der Nähe). Der Asynchrongenerator kann hierbei mit konstanter oder veränderlicher Last betrieben werden. Sechs Beispiele von acht – Moutier, Manegg, Lessoc, Bärenburg, Landquart, Muslen – gehen in dieser Richtung. Die Blindenergieerzeugung mittels Kondensatoren, sofern einige einfache schalttechnische Massnahmen getroffen werden, bietet auch bei allfälliger Überdrehzahl des Generators keine Schwierigkeiten. Dank den Kompensationskondensatoren können höherpolige Asynchrongeneratoren ($2p \geqslant 12$) noch wirtschaftlicher werden.

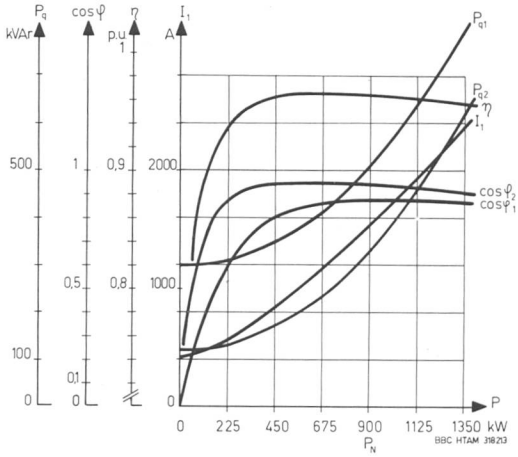


Bild 18. Charakteristiken Asynchrongenerator, pQO 500 ab 6, 400 V, 50 Hz, 900 kW, 1008 min^{-1}, Anlage Wasserkraftwerk Moutier.

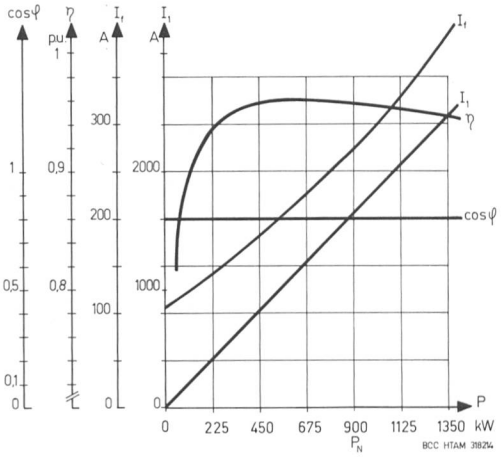


Bild 19. Charakteristiken Synchrongenerator, WG 500 dra 6, 400 V, 50 Hz, 900 kW, cosφ 0,8, 1000 min^{-1}.

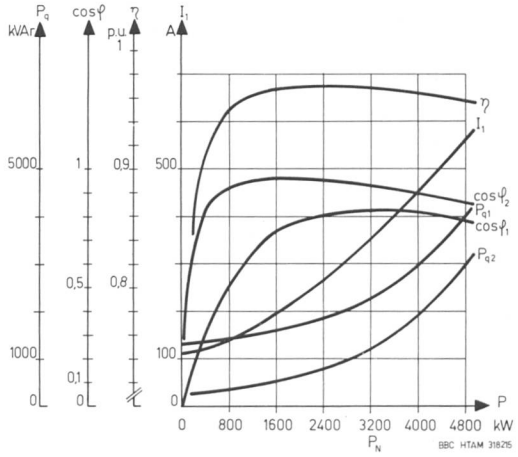


Bild 20. Charakteristiken Asynchrongenerator, MQG 3414 ko, 6600 V, 50 Hz, 3200 kW, 431 min^{-1}, Anlage Wasserkraftwerk Lessoc der Entreprises Electriques Fribourgeoises.

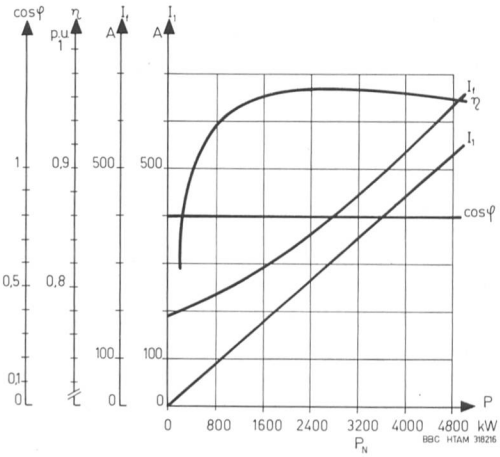


Bild 21. Charakteristiken Synchrongenerator, WA 166 h 14, 6600 V, 50 Hz, 3200 kW, cosφ 0,8, 428,6 min^{-1}.

In den Bildern 18 bis 21 sind die elektrischen Charakteristiken für 6- und 14polige Asynchron- und Synchrongeneratoren dargestellt. Es geht daraus hervor, dass im Wirkungsgrad die Asynchronmaschine etwas günstiger ist als die Synchronmaschine.

P	Wirkleistung
P_{q1}	Blindleistung ohne Kondensatorkompensation
P_{q2}	Blindleistung mit Kondensatorkompensation (nur linearer Anteil)
$\cos\varphi_1$	Leistungsfaktor ohne Kondensatorkompensation
$\cos\varphi_2$	Leistungsfaktor mit Kondensatorkompensation für den linearen Anteil der Durchflutung
η	Wirkungsgrad
I_f	Erregerstrom für Synchrongenerator
I_1	Statorstrom

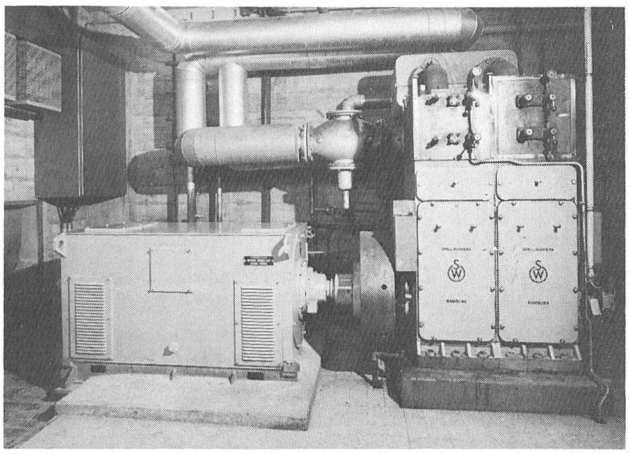
Ende 1980 wurden in der Schweiz kleine Wasserkraftwerke mit total 78 Asynchrongeneratoren gezählt, wovon 24 Stück ab 1971 in Betrieb gesetzt wurden. Weitere Kraftwerke mit dieser Maschinenart sind im Bau oder geplant. Vorgesehen sind Einheitsleistungen bis 12,5 MW.

Die technische und wirtschaftliche Grenzleistung für Asynchrongeneratoren liegt bei etwa 24 MW für 4polige, bei etwa 30 MW für 6polige und bei 45 MW für 8polige Maschinen. Die Grenzleistung ist in erster Linie nicht *elektrisch* begrenzt, sondern *mechanisch* durch die Beanspruchung der Überdrehzahl.

Die acht vorgelegten Beispiele zeigen, dass keine allgemein gültigen Regeln für den Einsatz von Synchron- beziehungsweise Asynchrongeneratoren aufgestellt werden können. In diesem Beitrag wurde versucht, die Eigenheiten der in Betracht zu ziehenden Maschinenarten aufzuzeigen. Es geht daraus hervor, dass ohne die jeweilige Gesamtbetrachtung des bestimmten Kundenprojektes keine Entscheidung vorgenommen werden kann. Jedes Projekt muss als Einzelfall untersucht werden, der endgültige Entscheid ist immer ein Kompromiss zwischen ausführbarer Technik und Wirtschaftlichkeit.

4.4 Symbole

C	Kapazität
cosφ	Leistungsfaktor
$\cos\varphi_1$	Leistungsfaktor ohne Kondensatorkompensation
$\cos\varphi_2$	Leistungsfaktor mit Kondensatorkompensation für den lineraren Anteil der Durchflutung
f	Frequenz (Hz)
I	Strom
I_c	Kondensatorstrom
I_{c2} (50)	Kondensatorstrom bei Kompensation des linearen Anteils (bei 50 Hz)
I_{c3} (50)	Kondensatorstrom bei vollständiger Kompensation (bei 50 Hz)
I_f	Erregerstrom für Synchrongenerator
I_m	Magnetisierungsstrom
$I_{m\delta}$	Linearer Anteil des Magnetisierungsstromes
I_{mfe}	Nichtlinearer Anteil des Magnetisierungsstromes
I_1	Statorstrom
M	Drehmoment
n	Drehzahl
P	Wirkleistung
P_q	Blindleistung



BBC 207772

Bild 22. Auch für nicht hydraulische Antriebe kann der Asynchrongenerator vorteilhaft eingesetzt werden. Asynchrongenerator QO 400 aya 8 in der üblichen Bauform IM B3 angetrieben durch eine Dampfkolbenmaschine in der Wasserkläranlage Lausanne–Vidy. Nenndaten: $U_n = 380$ V, $P_n = 224$ kW, $\cos\varphi_n = 0{,}81$, $n_n = 760\ \text{min}^{-1}$. Inbetriebnahme 1973.

P_{q1}	Blindleistung ohne Kondensatorkompensation
P_{q2}	Blindleistung mit Kondensatorkompensation für den linearen Anteil der Durchflutung
s	Schlupf
U	Spannung
η	Wirkungsgrad
ω	Winkelgeschwindigkeit

Index

d	Durchgangsdrehzahl
n	Nennwert
o	Leerlauf

Literatur

[1] *E. Danielson:* Reversibility of threephases motors with inductive winding. «The Electrical World» 1893-01-21.

[2] *J. W. Schroeder:* Der kondensatorerregte Asynchrongenerator. «Technische Rundschau» Nr. 54, 1963-12-27, S. 9–13.

[3] *Th. Bödefeld, H. Sequenz:* Elektrische Maschinen, 8. Auflage Springer, 1971, S. 197–236, 293–297.

[4] *R. Rompf:* 30000 Staustufen – Kleinwasserkraftwerke im Dienste des Umweltschutzes. «Das Wassertriebwerk» Nr. 11/1971, S. 73–77; Nr. 12/1971, S. 85–87.

[5] *W. Nüssli, S. Jacobsen, V. Bohun:* Erneuerung alter Wasserkraftwerke. «wasser, energie, luft» Heft 10, 1977, S. 235–243.

[6] *W. Jauslin:* Wasserkraftanlagen und Landschaftsschutz. «wasser, energie, luft», Heft 11/12, 1978, S. 299–301.

[7] *E. Pucher:* Innovation oder Stillegung von Kleinwasserkraftwerken? Internationale Fachtagung über Umbau und Erweiterung von Wasserkraftanlagen, Zürich 1979. Mitteilung Nr. 34 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, S. 185–192.

[8] *E. Pucher:* Nützliche Kleinwasserkraftwerke. «Technische Rundschau» Nr. 12, 1979-03-20, S. 25–27.

[9] *H. Oschanitzky:* Direkt und über Getriebe angetriebene Rohrgeneratoren. «Elektrizitätswirtschaft» Heft 4, 1963, S. 118–123.

Eine englische Übersetzung wird beim Verfasser etwa ab September 1984 erhältlich sein. Red.

Adresse des Verfassers: *Roland Kallmann*, dipl. El.-Ing. ETHL, Berechnungsingenieur bei BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Abteilung IFM Technik elektrische Mittelmaschinen, 5401 Baden.

Vor 100 Jahren: Pionierleistung Pumpwerk Genf

Das Grosspumpwerk «La Coulouvrenière» der Stadt Genf ist hundert Jahre alt. Es wurde in den Jahren 1883 bis 1886 gebaut, das heisst vor der Zeit des Wechselstroms, um trinkbares Seewasser für die unzähligen Brunnen und die Haushalte sowie Triebwasser unter einem höheren Druck (10 bar) zu fördern. Dieses Triebwasser wurde über ein Rohrsystem auf die ganze Stadt verteilt und diente dem Antrieb hydrostatischer Motoren und Turbinchen in den Werkstätten (vor allem der Uhrmacherei). Solche Motoren trieben auch die Dynamos für die elektrische Beleuchtung einiger Strassen und Plätze an. Die hydrostatische Energieübertragung ersetzte in Genf die sonst verwendete Transmission mit endlosen Stahlseilen.

Escher Wyss konnte aufgrund ihrer grossen Erfahrung und in Zusammenarbeit mit dem Initianten und Stadtingenieur *Théodore Turrettini* ein Gesamtprojekt für das Pumpwerk unterbreiten, das ihr 1883 den Auftrag einbrachte. Bereits 1886 nahm man die ersten sechs Gruppen in Betrieb, während die letzte Gruppe (die 18.) erst nach der Nationalen Ausstellung von 1896 installiert wurde. Heute arbeiten noch 16 Gruppen. Jede besteht aus einer vertikalachsigen, dreiflutigen Jonvalturbine (Durchmesser 4,2 m, Fallhöhe 1,8 bis 4,6 m), zwei horizontalen, doppeltwirkenden Kolbenpumpen und einem Windkessel. Der Förderstrom und dadurch die Drehzahlen stellen sich dem Bedarf entsprechend automatisch ein. Das Turbinendrehmoment kann zudem von Hand variiert werden. Drei Hauptfaktoren haben eine derart grosse Lebensdauer der maschinellen Ausrüstung von Escher Wyss bewirkt:

– den Anforderungen gut angepasste Auslegung und Konstruktion
– ausgezeichnete Ausführung
– grosse Sorgfalt des Betriebspersonals bei Wartung und Revisionen.

Des stark wachsenden Bedarfs wegen musste die Anlage bereits 1901 mit zwei elektrisch angetriebenen Turbopumpen von Sulzer ergänzt werden. Übrigens waren es die ersten zweistufigen Hochdruckpumpen, die bei Sulzer gebaut wurden. Die Räder wurden symmetrisch angeordnet, um die Axialschübe auszugleichen (Förderleistung 380 l/s bei 14 bar). Heute fördert das Werk «La Coulouvrenière» weiterhin Trinkwasser aus dem Genfersee – nun filtriert – in das Stadtnetz.

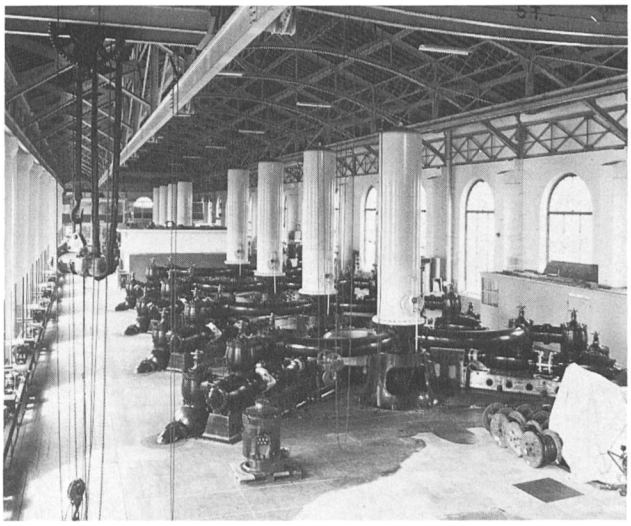



Bild 1. Ansicht auf einige Pumpen-Aggregate des Pionier-Pumpwerks «La Coulouvrenière» der Stadt Genf.