

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 95 (2004)
Heft: 9

Artikel: Drehzahlvariable Energieproduktion
Autor: Schwery, Alexander
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857935>

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: 16.02.2026

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

Drehzahlvariable Energieproduktion

Neue Perspektiven für Wasserkraftwerke

Durch den Einsatz drehzahlvariabler Antriebe lässt sich sowohl im Pump- als auch im Turbinenbetrieb ein optimaler Wirkungsgrad erreichen, was bei konstanter Drehzahl nicht möglich ist. Zur Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie werden in Wasserkraftwerken Synchronmaschinen verwendet. Dabei arbeitet die Maschine synchron mit der Netzfrequenz, also mit konstanter Drehzahl. Werden Synchronmaschinen für drehzahlvariable Antriebe eingesetzt, muss die Statorfrequenz geändert werden. Diese Lösung hat den Nachteil, dass die Leistungselektronik für die gesamte Maschinenleistung ausgelegt werden muss. Beim Einsatz von doppelt gespeisten Asynchronmaschinen ist es möglich, mit Hilfe der Schlupfleistung die Drehzahl zu ändern. Im Folgenden soll ein Überblick über die entsprechenden Lösungen gegeben werden.

In Wasserkraftwerken werden zur Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie Synchronmaschinen verwendet. Der Ausdruck synchron bezieht sich hierbei auf die Proportionalität zwischen Drehzahl und Statorfrequenz, wobei der Proportionalitätsfaktor der Kehrwert der Polpaarzahl ist. Dies kann mit folgender Beziehung dargestellt werden:

Alexander Schwery

den: $n = f_s / p$, wobei f_s die Statorfrequenz in Herz, n die Drehzahl in Umdrehungen pro Sekunde und p die Polpaarzahl ist.

Bei vorgegebener Netzfrequenz können mittels der Polpaarzahl Maschinen mit verschiedenen, den hydraulischen Gegebenheiten angepassten Drehzahlen gebaut werden. Diese werden auch Schenkelpolmaschinen genannt. Aus obiger Beziehung geht bei gegebener Polpaarzahl hervor, dass eine Änderung der Drehzahl eine Änderung der Statorfrequenz voraussetzt. Wie wir im Folgenden sehen werden, kann dies mit geeigneter Leistungselektronik erreicht werden. Dazu müssen Umformer der Synchron-

maschine vorgeschaltet werden, welche für die gesamte Maschinenleistung ausgelegt sein müssen.

Bei einer Asynchronmaschine besteht keine Proportionalität zwischen Statorfrequenz und Drehzahl. Die relative Drehzahldifferenz wird Schlupf genannt:

$s = (f_s - n)/f_s$. Diese Beziehung kann wie folgt umgewandelt werden: $n = f_s - s \cdot f_s = f_s - f_r$, wobei f_r die Frequenz der Rotorströme ist. Es ist also möglich, die Drehzahl der Asynchronmaschine durch eine Änderung der Rotorfrequenz zu beeinflussen. Dies kann durch den Einsatz von Leistungselektronik im Rotorkreis geschehen, welche nur für die Schlupfleistung ausgelegt sein muss.

Warum eine drehzahlvariable Energieproduktion?

Die Möglichkeit, die Drehzahl zu variieren, führt zu folgenden Vorteilen:

- optimaler Wirkungsgrad im Pump- und Turbinenbetrieb
- verbesserte Netzstabilität
- regulierbare Pumpleistung.

Der letzte Punkt führt zu einer Reduktion der Kavitation und von Vibrationen [1], was eine reduzierte Einbautiefe ermöglichen kann.

Optimaler Wirkungsgrad im Pump- und Turbinenbetrieb

Bild 1 zeigt die Kennlinien einer reversiblen Turbine für eine gegebene Geschwindigkeit. In Bild 1a ist der Verlauf des Wirkungsgrads in Abhängigkeit des Durchflusses im Pumpbetrieb dargestellt. Die Pumpturbine wurde so ausgelegt, dass zwischen dem vorgegebenen maxi-

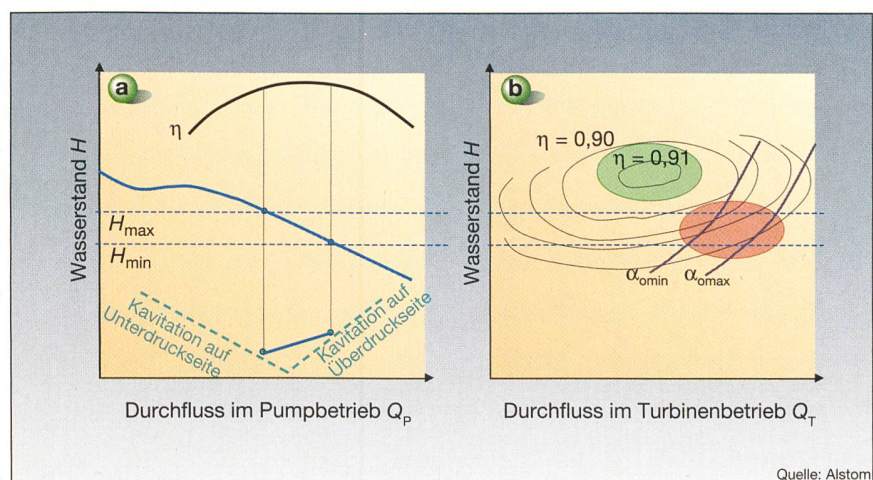


Bild 1 Wirkungsgrad in Pump- und Turbinenbetrieb

Bei gegebener Drehzahl ist ein optimaler Wirkungsgrad nicht in beiden Modi möglich. α : Anstellwinkel der Einlaufschaufeln; η : Wirkungsgrad

Bild a: Pumpen-Kennlinien; Bild b: Turbinen-Kennlinien

malen und minimalen Wasserstand ein optimaler Wirkungsgrad erreicht wird. Auf der rechten Seite sind die Kennlinien für den Turbinenbetrieb dargestellt. Die Höhenlinien geben den Wirkungsgrad in Funktion von Wasserstand und Durchfluss an. Die beiden zusätzlichen Kurven entsprechen dem maximalen und minimalen Anstellwinkel der Einlaufschaukeln. Es ist aus den beiden Darstellungen in Bild 1a und Bild 1b ersichtlich, dass bei gegebener Geschwindigkeit nicht in beiden Betriebsarten optimale Wirkungsgrade erreicht werden können.

Ist es allerdings möglich, die Geschwindigkeit zu variieren, verschieben sich die Kennlinien, und es kann mit optimalem Wirkungsgrad gepumpt und turbinert werden. Im Pumpbetrieb beispielsweise kann der Durchfluss über die Drehzahl so gesteuert werden, dass immer mit maximalem Wirkungsgrad gepumpt wird. Andererseits kann bei etwas reduziertem Wirkungsgrad auch mit maximalem Durchfluss gepumpt werden. Diese erhöhte Flexibilität und die effi-

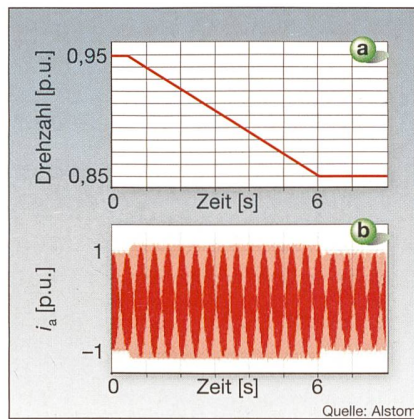


Bild 3 Drehzahl (oben) und Statorstrom (unten) während kurzfristiger Leistungseinspeisung ins Netz

zientere Energienutzung gehören zu den wichtigsten Vorteilen der drehzahlvariablen Energieproduktion.

Verbesserte Netzstabilität

Die folgenden Beispiele werden in [2] eingehend besprochen. Hier sollen nur die Resultate zusammengefasst werden. Das erste Beispiel (Bild 2) vergleicht das Verhalten eines konventionellen Synchrongenerators mit dem einer Varspeed¹⁾-Lösung bei einem netzseitigen Spannungseinbruch auf allen drei Phasen von 50% während 100 ms. Bild 2a zeigt den Verlauf der Drehzahl des Synchrongenerators. Zuerst nimmt die Drehzahl stark ab und pendelt dann lange um die Nenndrehzahl. Bild 2b zeigt die gleiche Situation mit einer Varspeed-Lösung. In diesem Fall nimmt die Asynchronmaschine kurz nach Aufheben der Störung wieder Nenndrehzahl an und trägt somit zur Stabilisierung des Netzes bei.

Das zweite Beispiel (Bild 3) zeigt auf, wie ein Varspeed-System zur Unterstützung des Netzwerkes gebraucht werden kann. Kurzfristig kann zusätzliche Leis-

tung in das Netz eingespeist werden, indem der Generator gebremst wird. Bild 3a zeigt dabei den Verlauf der Drehzahl. Die durch die Abnahme der Drehzahl frei werdende Leistung wird zusätzlich in das Netzwerk eingespeist, was aus Bild 3b ersichtlich wird. Der Statorstrom steigt während dieser Zeit um 10% an. Eine entsprechende Steuerung ermöglicht es, einen genau definierten Anteil von Blind- und Wirkleistung abzugeben.

Die praktische Umsetzung der drehzahlvariablen Energieproduktion

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten für die praktische Realisierung eines drehzahlvariablen Generators. Es sollen hier nur einige wenige Beispiele aufgezeigt werden. Prinzipiell kann man – wie schon Eingangs erwähnt – unterscheiden, ob die Leistungselektronik auf dem Stator oder auf dem Rotor eingesetzt werden soll. Für Generatoren kleinerer Leistung kann die Drehzahl über die Statorfrequenz geändert werden. Dazu kann ein lastgeführter Umrichter (LCI²⁾) verwendet werden, wie dies schematisch in Bild 4 dargestellt ist. Der Vorteil dieser Lösung liegt im grossen Variationsbereich der Drehzahl. Diese kann von null bis zur Nenndrehzahl variiert werden. Bei dieser Lösung werden Thyristoren als Schaltelemente verwendet. Die Schaltfrequenz ist tief und dementsprechend werden auch

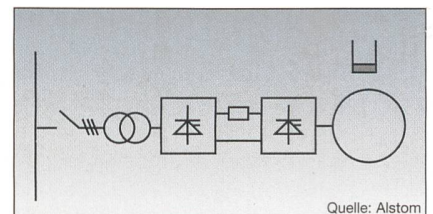


Bild 4 6-pulsiger lastgeführter Umrichter

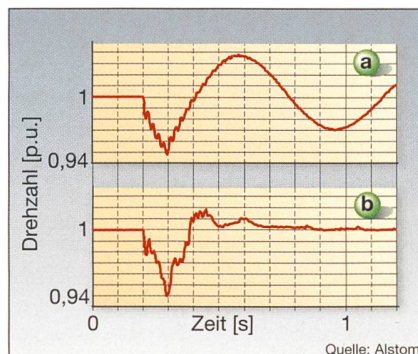


Bild 2 Drehzahl während Spannungseinbruch bei konventioneller Lösung (a) und Varspeed-Lösung (b)
Annahme: 50% netzseitiger Spannungseinbruch
Bild a: Konventionelle Variante. Die Synchronmaschine pendelt um Nenndrehzahl. Bild b: Varspeed-Variante. Die Asynchronmaschine ist schnell wieder im Betriebspunkt und stabilisiert das Netz.

Energie erzeugen ►► Energie transformieren ►► Energie messen ►► **Energie**

Mittelspannungsanlagen für die Energieverteilung müssen zuverlässig und wirtschaftlich sein.

UNIFLUORC

- ist modular aufgebaut und unterstützt einen platzsparenden Anlagenbau
- gestattet den Einsatz konventioneller Kabelanschlusstechnik
- ist ausgelegt für UN: 24 kV, IN: 630 A, Nennkurzzeitstrom (1s): 20 kA
- unterstützt Sie entscheidend beim Aufbau einer sicheren Energieversorgung

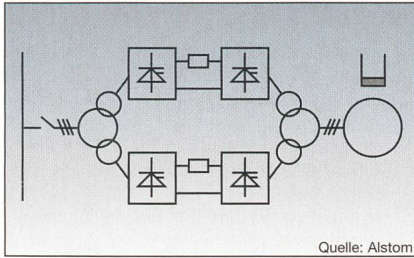


Bild 5 12-pulsiger lastgeführter Umrichter

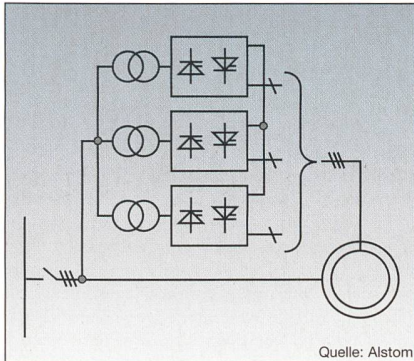


Bild 6 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit 12-pulsigem Direktumrichter im Rotorkreis

die Verluste in der Leistungselektronik minimiert. Gleichrichter und Wechselrichter sind durch einen Gleichstromzwischenkreis verbunden. Die Statorströme und damit auch das Drehmoment sind entsprechend mit Oberwellen belastet. Durch den Einsatz eines 12-pulsigen Umrichters wie in Bild 5 wird der Oberwellenanteil reduziert.

LCIs werden schon heute zum Starten von Pumpen in Wasserkraftwerken eingesetzt. In diesem Fall wird meistens die Pumpe entwässert und damit das Gegenmoment verkleinert. Dabei muss die Leistungselektronik nur für einen Bruchteil der Nennleistung des Generators ausgelegt sein. Nach dem Hochfahren wird

der LCI überbrückt und die Synchronmaschine direkt ans Netz gekoppelt.

Bei Generatoren mit Leistungen über 100 MVA werden die Umrichter so gross, dass diese Variante ökonomisch kaum mehr sinnvoll ist. In diesem Fall drängt sich der Einsatz von Asynchronmaschinen mit Schleifringläufern auf. Das Schema für eine solche doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit einem 12-pulsigen Direktumrichter³⁾ im Rotorkreis ist in Bild 6 dargestellt.

Lösungen mit Leistungselektronik im Rotorkreis weisen nur einen stark eingeschränkten Drehzahlvariationsbereich auf. Allerdings sind für den hier verfolgten Anwendungsbereich Variationen von $\pm 5\%$ bis $\pm 10\%$ bereits ausreichend. Genau genommen ist die Schlupfleistung, und damit die Leistung, für welche die Elektronik ausgelegt werden muss, direkt proportional zum Drehzahlvariationsbereich. Es ist daher darauf zu achten, dass das Gesamtsystem von Turbine, Asynchronmaschine und Leistungselektronik optimiert wird. Auch bei dieser Lösung werden als Schaltelemente Thyristoren eingesetzt. Dementsprechend sind die Rotorströme Oberwellenbelastet. Es werden auch netzseitig Oberwellen generiert, die gegebenenfalls gefiltert werden müssen, was zusätzliche Investitionen bedingt. Der Direktumrichter absorbiert immer Blindleistung. Diese muss je nach Anforderungen des Netzbetreibers direkt durch die Asynchronmaschine geliefert werden, was zu einer grossen und teuren Maschine führen kann. Dies kann durch den Einsatz eines Spannungsumrichters⁴⁾ (Bild 7) vermieden werden.

Durch die Trennung mittels Spannungszwischenkreis können Gleichrichter und Umrichter separat angesteuert werden. Die Schaltelemente sind in diesem Fall GTO, wobei durch eine adäquate Steuerung ein sehr geringer Ober-

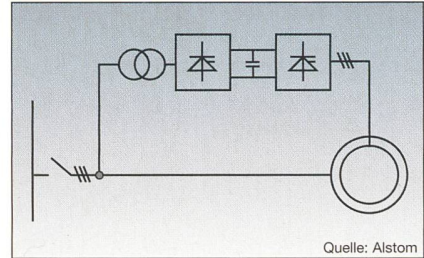


Bild 7 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit Spannungsumrichter im Rotorkreis

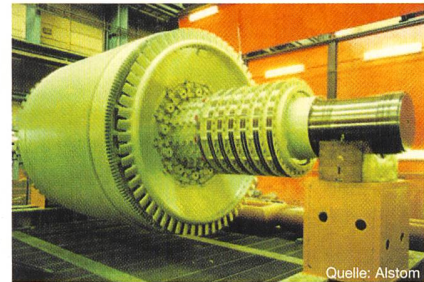


Bild 8 3-Phasen-Asynchronrotor der Anlage Seebach mit einer Leistung von 62 MVA

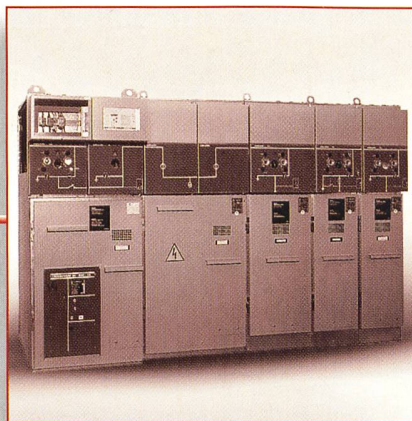
wellenanteil anfällt. Ein detaillierter Vergleich der letzten beiden Lösungen findet sich in [3].

Beispiele

Ein Beispiel für eine Stator-gespeiste Synchronmaschine ist in [4] beschrieben. Mit einem 100-MW-Synchronmotor handelt es sich um den derzeit weltweit grössten drehzahlvariablen Antrieb dieser Technologie. Er wird als Antrieb für ein Ventilatorsystem in einem Windkanal der NASA benutzt.

Doppelt gespeiste Asynchronmaschinen werden in der Schweiz für die Koppelung von Bahn- und Industrienetz benutzt. Bild 8 zeigt den 3-Phasen-Asynchronrotor der Anlage Seebach mit einer

verteilen



stationenbau

...plant, baut, verbindet...

Stationenbau AG
Schützenhausstrasse 2
5612 Villmergen
Telefon 056/619 88 00
Telefax 056/619 88 04
E-Mail: info@stationenbau.ch
www.stationenbau.ch

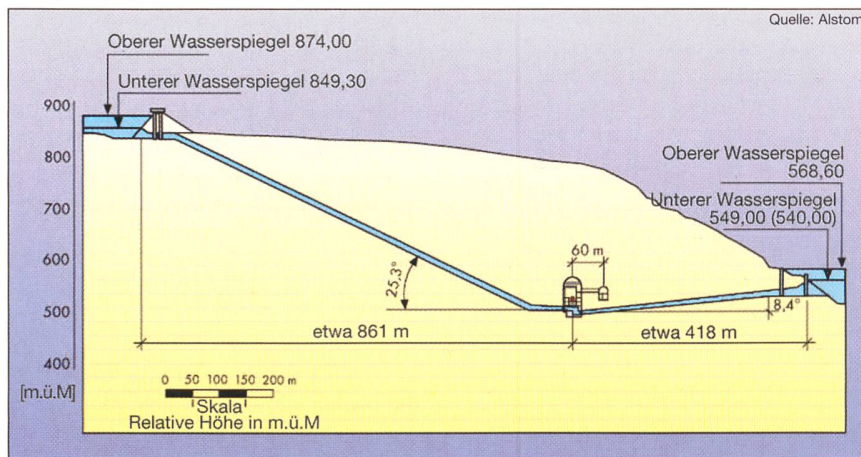


Bild 9 Ober- und Unterbecken der Anlage Goldisthal mit einer Höhendifferenz von 300 Metern

Leistung von 62 MVA und einem Drehzahlbereich von 475–525 Umdrehungen pro Minute.

Als Beispiel einer Anwendung von doppelt gespeisten Asynchronmaschinen in Wasserkraftwerken sei noch das Pumpspeicherwerk Goldisthal genannt. Bild 9 zeigt die geografischen Gegebenheiten dieser Anlage.

Das Kraftwerk wird von der VEAG⁵⁾ in der Nähe von Thüringen betrieben. Es ist ausgestattet mit zwei konventionellen Synchrongeneratoren mit je 265 MW Leistung und zwei Asynchronmaschinen der gleichen Leistung. Man erhofft sich durch die variable Drehzahl eine Wirkungsgradsteigerung von 5%. Ziel der Anlage ist Spitzenstromproduktion. Da die schwer regelbaren Braunkohle-Kraftwerke möglichst durchgehend und konstant laufen müssen, kann der Nachtstrom (bei geringer Nachfrage) zum Füllen des Oberbeckens verwendet werden. Mit Hilfe dieses Pumpspeicherwerkes ist es möglich, innerhalb von 20 Sekunden Spitzenleistung ans Netz zu liefern. Die für Spitzenzeiten eingesetzten Gaskraftwerke brauchen dazu typischerweise 20 Minuten⁶⁾.

Abschliessende Bemerkungen

Verschärfte Marktbedingungen durch Liberalisierung führen zu grösseren Preisunterschieden zwischen Band- und Spitzenstrom. Beispiele wie das grosse Blackout in New York im August 2003 bzw. jenes im September 2003 in Italien zeigen auf, wie wichtig die Netzstabilität ist, bzw. wie teuer Zusammenbrüche dieser Art zu stehen kommen. Pumpspeicherwerke stellen die bisher effizienteste Möglichkeit dar, grössere Mengen an Energie zu speichern, und tragen damit massgeblich zum Erhalt des Gleichge-

wichtes zwischen Verbrauch und Produktion bei. Die Leistungselektronik im Einsatz in Kraftwerken ist noch relativ jung im Vergleich zur Generator- und Turbinentechnologie. Es sind hier weiterhin grosse Fortschritte zu erwarten. Diese und andere Gründe weisen darauf hin, dass drehzahlvariable Energieproduktion eines Tages eine wichtigere Rolle als heute einnehmen wird.

Für die Entwicklung einer Varspeed-Lösung müssen alle Elemente der Energieumwandlungskette zusammen betrachtet werden. Viel eingehender noch als dies bisher der Fall ist, müssen Turbine, Generator und Leistungselektronik aufeinander abgestimmt werden.

Referenzen

- [1] T. Gjengedal: Assessing the Benefits of Adjustable Speed Hydro Machines. IEEE Power Tech 1999 Conference Budapest, Ungarn.
- [2] D. Schafer, J.-J. Simond: Adjustable speed Asynchronous Machine in Hydro Power Plants and its Advantages for the Electric Grid Stability. Cigré Report, Paris 1998.
- [3] A. Sapin, A. Hodder, J.-J. Simond: Doubly-Fed asynchronous machine with 3-level VSI for variable speed pump storage. ICEM 2000.
- [4] R. Bhatia, A. Bonanini, J. T. Inge: Adjustable Speed Drive Using Single 135 000 HP Synchronous Motor. Cigré 1998.

Angaben zum Autor

Dr. **Alexander Schwery** schloss sein Studium als Elektroingenieur 1994 an der ETH in Lausanne ab. 1999 promovierte er am Institut für Elektrische Maschinen derselben Hochschule. Im selben Jahr begann er auch seine Tätigkeit als Ingenieur für Spezialberechnungen im Bereich elektrischer Maschinen in der ABB Power Generation. Mit der Verschiebung dieser Aktivitäten zu Alstom wurde er Teil des Generator Technologie Zentrums, in dem er seit zwei Jahren die elektrische Gruppe leitet. Berufsbegleitend schloss er 2002 ein Nachdiplomstudium in Betriebswissenschaften an der ETH Zürich ab. Seit kurzem ist er Mitglied der Kommission RDP-CREE, welche die Förderung von Forschungsprojekten im Bereich der Elektrizität zum Ziel hat.

Alstom, CH-5252 Birr,
alexander.schwery@power.alstom.com

¹ Varspeed: variable speed. In diesem Fall wurde eine Asynchronmaschine mit Schleifringläufer und 12-pulsigem Direktumrichter auf dem Rotor verwendet.

² Englisch: Load Commutated Inverter.

³ Englisch: Cyclo Converter.

⁴ Englisch: Voltage Source Inverter.

⁵ VEAG: Vereinigte Energiewerke AG, www.veag.de

⁶ Zusätzliche Informationen zu diesem Kraftwerk: www.lahmeyer.de; www.wattenfall.de

Production d'énergie à vitesse variable

Nouvelles perspectives pour les centrales hydroélectriques

L'utilisation d'entraînements à vitesse variable de rotation permet d'obtenir un rendement optimal en service de pompage aussi bien qu'en turbine, ce qui n'est pas possible lorsque la vitesse est fixe. La transformation d'énergie mécanique en énergie électrique est réalisée dans les centrales hydroélectriques au moyen de machines synchrones, celles-ci étant synchronisée sur la fréquence du réseau, donc tournant à vitesse constante. Si l'on souhaite utiliser des machines synchrones pour des entraînements à vitesse variable, la fréquence du stator doit être modifiée. Cette solution présente l'inconvénient que l'électronique de puissance doit être dimensionnée pour la puissance totale de la machine. Avec des machines asynchrones à double alimentation, il est possible de faire varier la vitesse de rotation à l'aide de la puissance de glissement. L'article donne un aperçu des solutions applicables.



Neu: Toyota Prius mit Hybrid Synergy Drive. Der neue Antrieb, der die Welt voranbringt.

Wenn es um Verantwortung für die Umwelt geht, sind heute Taten statt Worte gefragt. Denn mit den Ansprüchen an die Mobilität steigt die Zahl der Autos. Darum müssen ökologischere Fahrzeuge entwickelt, die CO₂-Emissionen gesenkt und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringert werden.

Toyota nimmt seine Verantwortung wahr und lanciert den neuen Prius mit Hybrid Synergy Drive: Er verbindet hohe Fahrleistung mit niedrigem Treibstoffverbrauch und umweltschonenden Emissionswerten – ohne bei Benutzerfreundlichkeit, Fahrspass und Qualität den kleinsten Abstrich zu machen. Denn der Prius ist ein echter Toyota!

Wir sind überzeugt: Die Zeit ist reif für den Hybrid Synergy Drive – und die Welt ist bereit dafür. Darum werden wir schon in Kürze eine ganze Reihe von Toyota-Modellen mit dieser revolutionären Technologie ausstatten.

Als Erster ist der Toyota Prius mit dem Hybrid Synergy-Drive-System ausgerüstet. Die Kombination eines kraftvollen VVT-i-Benzinmotors mit einem emissionsfreien Elektromotor senkt den Treibstoffverbrauch entscheidend und macht den Prius zu einem der umweltfreundlichsten Fahrzeuge überhaupt – ohne Kompromisse bei Leistung und Fahrspass.

Der neue Toyota Prius verkörpert eine neue Entwicklungsstufe in der Automobiltechnologie – und ist gleichzeitig ein grosser Schritt für die ganze Welt. Die Folgen lassen hoffen: sauberere Luft, weniger Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energieträgern, die «friedliche Koexistenz» von Mensch und Natur.

Der neue Toyota Prius mit Hybrid Synergy Drive. Ein neuer Antrieb für die Welt.

Präsident, Toyota Motor Corporation



The power to move forward

www.prius.ch





SPILLMANN/FELSER/LEO BURNETT

Entscheiden Sie sich für eine unserer Lösungen und Sie erhalten nebst den neusten Telefonapparaten, Faxgeräten und Telefonzentralen eine fachkundige Installation, Zugriff auf das flächendeckende Netz von Swisscom Mobile und Internetzugang via Bluewin mit dem leistungsfähigen ADSL-Anschluss. Eine sichere Vernetzung von Arbeitsplätzen auch über verschiedene Standorte gehört genauso zu unseren Leistungen wie eine qualifizierte Beratung und ein Service, die beide auch nach dem Kauf weitergehen. Damit Sie noch mehr Zeit für Ihre Kunden haben. Rufen Sie uns an für eine kostenlose Beratung: Zürich 044 295 37 77, Luzern 041 367 25 25, St. Gallen 071 492 21 21, Olten 062 832 18 18, Lausanne 021 216 61 61. www.swisscom-fixnet.ch/kmu.

Warum nicht einfach von persönlicher Beratung profitieren?

Festnetz, Mobile, Internet und Data für alle KMU.

swisscom **fixnet**
Einfach verbunden.