

Moderne Leistungselektronik für den effektiven Betrieb von Klein-Wasserkraftwerken bis 1 MW

J. Bard, Kassel; R. Hübner, Berlin; H. Mrugowsky, Rostock

Wasserkraft ist neben Sonne und Wind eine unverzichtbare, erneuerbare Energiequelle. Sie leistet auch im wasserkraftarmen Deutschland einen Beitrag zum Übergang auf eine umweltschonendere Stromerzeugung. Mit innovativen Frequenzumrichtern wird die Turbine drehzahlvariabel. Dadurch lässt sich das schwankende Wasserkraftangebot optimal ausnutzen. Der Stromertrag erhöht sich um durchschnittlich 10 %. Zusätzlich machen gute Förderbedingungen diese Energieerzeugung für Nutzer und Elektro-Branche interessanter.

Klein-Wasserkraftwerke sind wieder gefragt

Seit mehr als 1500 Jahren nutzt der Mensch die Bewegungsenergie des Wassers. Viele Jahre wurde sie als mechani-

sche Energie zum Betrieb von Wasserschöpfwerken, von Mühlen und von Hammerwerken eingesetzt. Ende des 19. Jahrhunderts übernahmen kleine Wasserkraftanlagen die Stromerzeugung und eröffneten den Beginn der öffentlichen Stromversorgung in Deutschland. 1925 existierten allein in Deutschland neben rund 37 000 Wasserrädern etwa 21 000 Turbinen. Mehr als die Hälfte der gesamten Turbinenleistung von etwa 1400 MW wurde bereits zur Stromerzeugung genutzt. Die mittlere Leistung der Turbinen lag bei etwa 65 kW, die der Wasserräder nur bei ca. 6 kW. Als Folge des Zweiten Weltkrieges und der Entwicklung der 50er- und 60er-Jahre zur Schaffung großer Kraftwerke (Kohle, Gas, Wasser, Kernenergie) verringerte sich die Anzahl der in

Autor

Dipl.-Phys. *Jochen Bard*, Leiter Energiewandlungsverfahren am Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), Kassel; Dipl.-Ing. *Rainer Hübner*, Vertriebsleiter der transresch Antriebssysteme Berlin GmbH; Prof. Dr.-Ing. *Hartmut Mrugowsky*, Universität Rostock, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für elektrische Energietechnik



❶ Wasserkraftwerk der EAM in Katlenburg, 60km nordöstlich von Kassel am Rand des Harzes. Nutzgefälle $h = 3,2$ m, Wassermenge $Q=4,5$ m³/s, Turbinenleistung $P=105$ kW

(Foto: ISET Kassel)

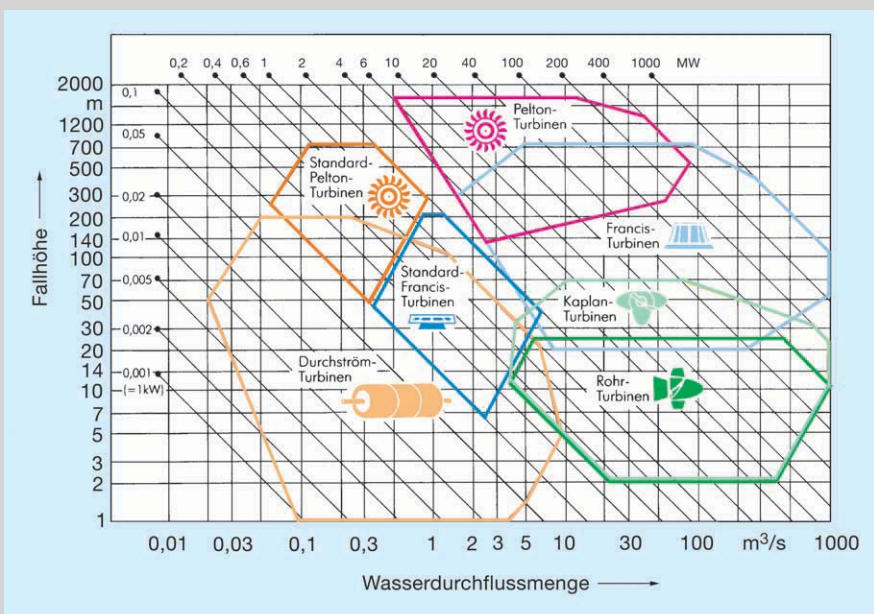
Mitteleuropa betriebenen Klein-Wasserkraftwerke deutlich. Erst die steigende Umweltbelastung infolge der Verbrennung fossiler Energieträger in Wärmekraftwerken und der dadurch erzeugte po-

litische Druck zur Förderung regenerativer Energien führte zu einem Umdenken. Seitdem gilt: Erhaltung und Rekonstruktion der bestehenden Anlagen und Neubau (Bild 1).

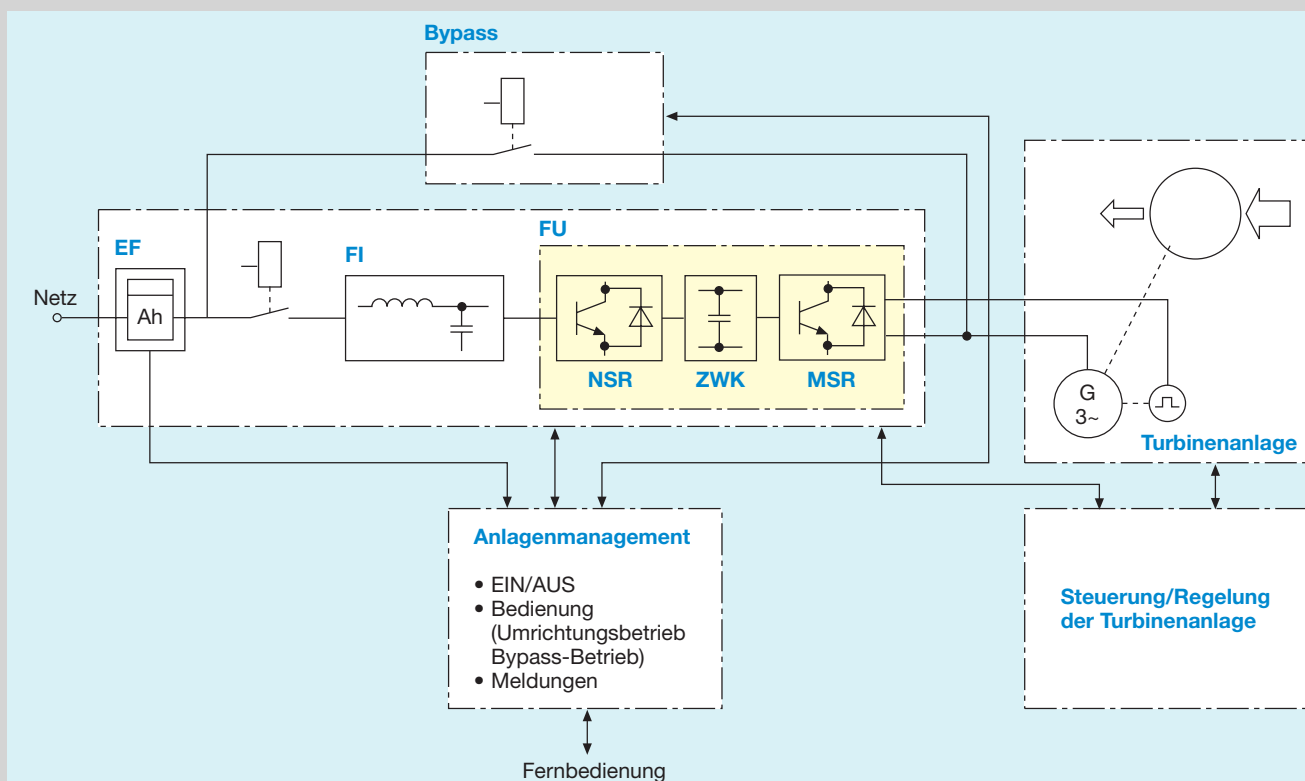
Gleichzeitig entstand ein technisch weitgehend ausgereiftes Sortiment unterschiedlich aufgebauter Turbinentypen wie Francis-, Kaplan-, Durchström-, Pelton-, Rohr- und Rohrheberturbinen. Bild 2 zeigt für einige dieser Typen die Einsatzgebiete. Sie kennzeichnen die unterschiedlichen, leistungsbestimmenden Größen Nutzfalldhöhe [m] und Wasserdurchflussmenge [m³/sec].

Inzwischen ist das Potential für große Laufwasserkraftwerke in Deutschland weitgehend ausgeschöpft. Parallel dazu liefern ca. 4600 privat betriebene Kleinanlagen rund 10 % des insgesamt in Deutschland mit Wasserkraft gewonnenen Stromes. Trotz des erfolgreichen Aufholprozesses im zurückliegenden Jahrzehnt ist das in den neuen Bundesländern noch ungenutzte, technische Wasserkraftpotential immer noch doppelt so groß wie das im alten Bundesgebiet. Darüber hinaus weist eine Potentialstudie an vorhandenen Stauanlagen mit höchstens 5 m Fallhöhe und mindestens 100 kW installierter Leistung in den drei Ländern Großbritannien, Niederlande, Deutschland ein ökonomisch nutzbares Potential in der Europäischen Union von ca. 2000 MW aus.

Ein technologischer Fortschritt würde voraussichtlich die Energieerträge um durchschnittlich 10 % erhöhen, die Kosten um 20



2 Turbinen für Klein-Wasserkraftanlagen: Nutzfalldhöhe, Wasserdurchflussmenge und der hier nicht angegebene Anlagenwirkungsgrad bestimmen im wesentlichen die nutzbare elektrische Leistung [MW]. Eine richtige Turbinenauswahl ist die Grundvoraussetzung, um hohe Jahresenergieerträge kWh_{el} zu erzielen.



3 Prinzip einer drehzahlverstellbaren Turbine mit Frequenzrichter in IGBT-Technologie

(Quelle: transresch Antriebssysteme Berlin)

NSR – getakteter Netzstromrichter (mit IGBT); ZWK – Gleichspannungs-Zwischenkreis; MSR – getakteter Maschinenstromrichter (mit IGBT); FI – EMV-Filter; EF – Energieerfassung

% reduzieren und ein weiteres Potential von 1000 MW erschließen. Dabei setzt die Branche auf innovative, unregulierte Turbinenkonzepte, die auch eine erhebliche Baukostensenkung bewirken. Ihre Kombination mit Drehzahlvariabilität und neuen Generatoren unterstützt die höhere Ausbeute.

Effektivitätssteigerung durch Drehzahlverstellung

Auch bei allen im Netz- oder Inselbetrieb betriebenen Klein-Wasserkraftwerken sollen Frequenz und Spannung in engen Grenzen konstant gehalten werden. Das bedeutet, dass bei direkter Speisung des „starrten“ Netzes oder der Inselnetzverbraucher der Asynchron- oder Synchrongenerator ebenfalls bei unterschiedlichem Wasserangebot (Netzbetrieb) und veränderlicher Generatorleistung (Inselbetrieb) mit (praktisch) konstanter Drehzahl betrieben werden muss. Das Wirkungsgradoptimum und das relative Leistungsmaximum einer Wasserturbine verschieben sich aber bei Verminderung der Nutzfallhöhe zu niedrigen Drehzahlwerten, so dass für eine effektive Nutzung des Energiepotentials dann die Drehzahl abgesenkt werden müsste.

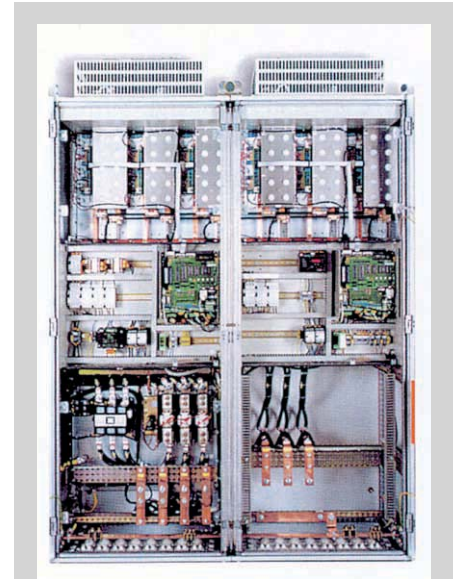
Noch kritischer sind die Verhältnisse bei Inselbetrieb, wo die Turbinenleistung mit Hilfe der Drehzahlregelung über den relativ aufwendigen und trägen Leitapparat in der Turbine dem sich oft sehr schnell ändernden Leistungsbedarf der Verbraucher anzugleichen ist.

Der effektive Betrieb der Klein-Wasserkraftanlage erfordert deshalb eine arbeitspunktabhängige Drehzahlanpassung der

Turbine an das verfügbare Wasserangebot und/oder an den sich in weiten Grenzen schnell ändernden Leistungsbedarf des Netzes. Die daraus ableitbare Forderung nach einer Entkopplung der Turbinen- bzw. Generatorfrequenz lässt sich bei einer vorhandenen Anlage lediglich durch Einschalten eines modernen Frequenzumrichters erfüllen. Veränderungen an der Turbine und ihren Leit- einrichtungen sowie an den wasserbaulichen Anlagen sind dafür nicht erforderlich. Auch die vorhandene Asynchron- oder Synchronmaschine kann beibehalten werden. Evtl. können die Leiteinrichtungen und die Geräte zur Wasserstands- bzw. Drehzahlregelung der Turbinenanlage sogar vereinfacht werden oder ganz entfallen. Das gilt auch für die Nachrüstung.

Zum Anlaufen des Wasserkraftanlage ist der Erregerkreis des Generators aus dem öffentlichen Netz oder aus einer anderen, geeigneten Stromquelle zu versorgen.

Mit der Drehzahlverstellung wird ein Prinzip verwirklicht, das sich seit Jahren bei serienmäßig gefertigten Windenergieanlagen vor allem im obersten Leistungsbereich bewährte. Aus dieser Übertragung auf Wasserkraftwerke errechnen sich in Abhängigkeit vom Turbinentyp und von den Wasserbedingungen Verbesserungen der Energieerträge von 5-15 %. Außerdem ermöglicht die Drehzahlvariabilität in Verbindung mit dem Umrichtereinsatz eine stärkere Flexibilität bezüglich der hydraulischen Auslegung des Maschinensatzes hinsichtlich Nettotallhöhe und Wassermenge. Obwohl erste positive Erfahrungen mit drehzahlvariablen Turbinen an verschiedenen Standorten vorliegen, lässt die Bewertung der Testobjekte erkennen, dass es noch weiterer Forschungs- und Entwick-



4 Getakteter Frequenzumrichter für 400 kVA aus der Typenreihe VSI-RP für hochdynamische und netzfreundliche Antriebe (50 kVA bis 2500 kVA)

(Quelle: transresch Antriebssysteme Berlin)

lungsarbeiten bedarf, bis mit dem breiteren Einsatz drehzahlvariabler Turbinen zu rechnen ist.

Umrichter aus der Antriebstechnik

Ausgehend von den Erfahrungen der Windenergiebranche [1] stehen auch für die drehzahlvariable Wasserturbine drei unterschiedliche Generatortypen zur Verfügung. Dazu gehört neben den bereits in Wasserkraftanlagen eingesetzten Synchron- oder Asynchrongeneratoren die

über- und untersynchron betriebene, doppeltgespeiste Asynchronmaschine mit Schleifringläufer. Am aussichtsreichsten erscheint die in der Antriebstechnik bewährte, über einen vorgeschalteten Umrichter gespeiste, robuste und kostengünstige Asynchronmaschine, die sowohl für netzgekoppelten als auch für Inselbetrieb geeignet ist. Bild 3 beschreibt den prinzipiellen Aufbau der Anlage mittels Frequenzumrichter (FU) und drehzahlvariabler Asynchronmaschine. Die Struktur des Umrichters entspricht der aus der Antriebstechnik bekannten Schaltung [2]. Bild 4 zeigt den Prototyp eines solchen Umrichters einer Typenreihe von 50 – 2500 kW. Der Umrichter formt nicht nur mit minimalen Verlusten die eingangsseitige Netzspannung in eine zur Drehzahländerung notwendige, variable Maschinenspannung und -frequenz um. Er erlaubt gleichzeitig das Bereitstellen der Blindleistung für Maschine (Erregerblindleistung) und Netz sowohl bei Netz- als auch bei Inselbetrieb. Bei gestörtem Umrichter sichert ein Bypass die Weiterführung des Betriebes. Konzeption und Realisierung eines solchen Klein-Wasserkraftwerkes für ca. 100 kW einschließlich des Nachweises der Erhöhung der Energieerträge beinhaltet das EUREKA-Projekt 2104 POOTGES (Power Output Optimized Turbine-Generator-System; Speedvariable Turbine Generator System with Frequency Converter). Fünf auf dem Gebiet von Wasserturbinen, Klein-Wasserkraftwerken und Antriebstechnik (Generatoren/Motoren, Leistungselektronik/Frequenzumrichter) erfahrene, mittelständische Hersteller aus Tschechien, Österreich und Deutschland haben sich in dem Projekt zusammengeschlossen.

Wasserkraftnutzung kleinster Energiepotentiale

Bereits unterhalb einer Leistungsgrenze von 20-50 kW wird Wasserkraft erfolgreich zur Stromerzeugung genutzt. Das gewiss nicht gebirgige Mecklenburg-Vor-

pommern betreibt beispielsweise 16 Klein-Wasserkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 2,2 MW. Darunter befinden sich neun im Leistungsbereich von 5-40 kW. Darüber hinaus gibt es dort etwa 160 ehemalige Wasserkraftstandorte und andere wasserbauliche Anlagen, die – wie in anderen Bundesländern – mit vertretbarem Aufwand unter Nutzung der beschriebenen Technologie reaktiviert werden können. Dabei handelt es sich um relativ kleine Energiepotentiale für Leistungen zwischen 5 und 20 kW.

Als Antriebe stehen in diesem Bereich auch Wasserräder und -schnecken zur Verfügung. Bei den besonders einfach aufgebauten Rohrheberanlagen kommt eine speziell angepasste Propellerturbine in Verbindung mit einer netzgekoppelt betriebenen Asynchronmaschine zum Einsatz. Auch unter 50 kW verbessert die drehzahlvariable Turbine den Energieertrag der Anlage. Bei solch kleinen Leistungen übernehmen häufig im Zwischenkreis des Umrichters Bild 3 angeordnete Batterien das Bereitstellen der Hilfsenergie. Eine derartige Kleinanlage erprobt gegenwärtig erfolgreich die Universität Rostock.

Wirtschaftlichkeit von Klein-Wasserkraftanlagen

Die Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage wird maßgeblich durch die Investitions- und Betriebskosten sowie den jährlichen Energieertrag in kWh bestimmt. Neuanlagen im Bereich von 70 bis 1000 kW erfordern im Durchschnitt Investitionen zwischen 17.000 und 20.000 DM pro kW installierter Leistung. Bei einer typischen jährlichen Auslastung von 4000 bis 5000 Volllaststunden liegen die Stromgestehungskosten zwischen 12 und 15 Pfg/kWh. Die Investitionskosten hängen stark von der installierten Leistung, von der Fallhöhe, vom Zustand der wassertechnischen Ausrüstungen und von Zusatzkosten beispielsweise für den Umwelt- und Natur-

schutz ab. Entscheidend ist ebenfalls der Arbeitsumfang, der für Neubau, Reaktivierung oder Modernisierung des Maschinenparks zu erbringen ist (Bild 5).

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit unterstützt die Bundesregierung die Wasserkraftnutzung durch zwei Förderprogramme. Gemäß dem „Erneuerbaren Energie-Gesetz“ (EGG) [3] wird der Strom aus Wasserkraftwerken mit einer installierten elektrischen Leistung bis 5 MW mit 15 Pfg/kWh vergütet. Allerdings gilt dies bei Anlagen größer 500 kW nur für den Teil des eingespeisten Stromes im Abrechnungsjahr, der dem Verhältnis 500 kW zur Anlagenleistung in kW entspricht. Der Preis für die restliche Energie beträgt 13 Pfg/kWh (vgl. EEG §4).

Darüber hinaus beteiligt sich die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) im Rahmen des „Programms zur Förderung erneuerbarer Energien“ an der Mitfinanzierung von Investitionen für Wasserkraftanlagen durch Darlehen mit Restschuldenerlass. Auch hier reduziert sich anteilig der geförderte Betrag oberhalb 500 kW. Für die Errichtung von Anlagen dieser Größe werden je kW installierter Nennleistung 1.500 DM der Teilschuld erlassen. Bei Erweiterung oder Reaktivierung sinkt dieser Betrag um 500 DM/kW. Dabei wird in diesem Fall eine Stillstandszeit von mindestens drei Jahren vorausgesetzt.

Durch die wirtschaftliche Unterstützung finden sich immer mehr private Interessenten, die im Bereich ihrer Grundstücke in Klein- und Kleinst-Wasserkrafttechnik investieren. Sie decken ggf. zusammen mit anderen, ebenfalls geförderten Energiequellen wie Wind [1] und Sonne [4] nicht nur ihren eigenen Energiebedarf zu niedrigsten Kosten, sondern liefern Strom ins Netz. Vielfach handelt es sich um Liegenschaften, die über stillgelegte Wasserkraftanlagen mit rein mechanischem Abtrieb verfügen (z.B. Mühlen, Sägewerke usw.) und für die die Wassernutzungsrechte noch vorliegen.

Die Reaktivierung bzw. Umgestaltung derartiger Anlagen ist nicht nur für den Eigentümer, sondern auch für das Elektrohandwerk und andere Gewerke interessant. Ein weiteres handwerkliches Geschäftsfeld steht im Zusammenhang mit der Tendenz zur dezentralen Stromversorgung zur Verfügung.

Literatur:

- [1] *Twelwe, J.:* Windernergie – Ein Beschäftigungsfeld mit Zukunft. Elektropraktiker, Berlin 54(2000)9, S. 762-765
- [2] *Kabisch, H.:* Trends bei drehzahlverstellbaren NS-Antrieben. Elektropraktiker, Berlin 53(1999)11, S.1022 – 1023
- [3] *Wagner, S.:* Solarstrom vor dem Durchbruch. Elektropraktiker, Berlin 54(2000)7, S. 564 – 565
- [4] *Haarpaintner, G.:* Vom Tausend- zum Hunderttausend-Dächer Programm. Elektropraktiker, Berlin 54(2000)5, S. 421 – 424

