Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 89 (1971)

Heft: 13

Artikel: Zur Optimierung und Regelung von elektrischen Verbundnetzen unter Einsatz von Prozessrechnern

Autor: Bühler, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84806

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: 08.08.2025

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

für die längerfristigen Entwicklungen. Dazu gesellt sich noch der Umstand, dass erst die Raumfahrt mit den Bildern unseres Planeten Millionen von Menschen zum Bewusstsein gebracht hat, wie eng begrenzt und klein sich unser einsames, kostbares Raumschiff in dieser Öde des Weltraumes ausnimmt. Dieser farbenprächtige Ball ist alles, was uns gegeben wurde und auf ihm leben wir entweder noch für ungezählte Generationen oder gehen gemeinsam zu Grunde. Die Tatsache, dass der Mensch bei weiterem Raubbau, also ohne Rücksichtnahme auf die Regenerationsfähigkeit unserer Biosphäre, einem Schmarotzer gleicht, der allmählich so zahlreich und gierig wird, dass er den Wirt zerstört, auf dem er lebt, ist uns erst jetzt zum Bewusstsein geworden.

Was können wir tun, um das auf uns zukommende Unheil abzuwenden? Sicher liegt es nicht in unserem Vermögen, das vorwärtsstürmende Ungeheuer des wirtschaftlichen Wachstums plötzlich abzubremsen, bzw. umzulenken. Es wird noch einige Zeit dauern, noch weit grösserer Umwelt- und Zivilisationsschäden bedürfen, ein allgemein spürbares Absinken der Qualität unseres Lebens eintreten, bis wir die ursprünglich sicher gerechtfertigte, inzwischen aber zur heiligen Kuh gewordene Steigerung des quantitativen Wachstums durch neue, umweltverträgliche Zielsetzungen ersetzen. Ziele, die – wie man so schön sagt – den Menschen wieder mit all seinen Empfindungen und Bedürfnissen in den Mittelpunkt setzen, die nicht nur auf den quantifizierbaren Wohlstand, sondern umfassender, des Menschen Wohlfahrt ausgerichtet sind. Ziele, die den Menschen von Raubbau und kurzfristigem Gewinnstreben weg und zur Harmonie mit der natürlichen Umwelt führen und die verträglich sind mit seiner Verantwortung gegenüber den kommenden Generationen.

Für diese Zielsetzungen können wir uns als Staats- und Weltbürger einsetzen. Als Ingenieure, Architekten, Planer und Unternehmer haben wir aber die Möglichkeit, wenigstens unseren täglichen Entscheidungsspielraum auszunützen in der Hoffnung, dass steter Tropfen auch diesen Stein aushöhlt. Eine gemeinsame Leistung, die zum Beispiel der Schweizerische Ingenieur- und Architekten-Verein an die Hand nehmen könnte, wäre ein «Handbuch für umweltgerechtes Bauen». Eine Sammlung von erkannten Einflussfaktoren, konstruktiven Möglichkeiten und Ideen, um das von uns geforderte Bauvolumen wenigstens so rücksichtsvoll wie möglich in unsere natürliche Umgebung einzupassen. Dass eine solche Kommissions- oder Gemeinschaftsarbeit, an der sinnvollerweise Bauingenieure, Architekten, Planer, Kultur- und Forstingenieure, Biologen und Mediziner zusammenarbeiten sollten, ein grosses Umdenken in unseren Berufskreisen zur Folge haben könnte, dürfte eine der positivsten Auswirkungen sein.

Wenn der alternde Faust die sinnvollste irdische Tätigkeit darin sah, Land urbar zu machen, zu kolonisieren, Dämme und Kanäle zu bauen und Philemon zu seiner Baucis sagen konnte:

Kluger Herren kühne Knechte
gruben Gräben, dämmten ein
schmälerten des Meeres Rechte,
Herr an seiner Statt zu sein

so wird uns Bauleuten an der Schwelle des dritten Jahrtausends die Aufgabe zufallen, des Meeres Rechte zu vertreten, als Anwalt der Natur zu amten und dafür zu sorgen, dass wir auf die Dauer in Harmonie mit ihr leben können.

Während Jahrtausenden war die Eroberung der Natur des Menschen höchstes Ziel. Können wir die archetypischen Vorbilder, die kulturellen Vorstellungen, die sich im Laufe der Zeit gebildet haben, den neuen Verhältnissen anpassen? Wenn wir die gleiche Schaffenskraft, Erfindungsgabe und Ausdauer für die neuen Aufgaben aufwenden, die uns diesen gewaltigen Triumph über die Kräfte der Natur ermöglicht haben, so braucht auch die Zukunft für unsere Jugend nicht zu einer bedrückenden Vision zu werden, sondern viel eher zu einer hoffnungsvollen Herausforderung.

Adresse des Verfassers: Dr. *E. Basler*, Ingenieurbüro Basler & Hofmann, Forchstrasse 395, 8008 Zürich.

Literaturverzeichnis

[1] *De Salla Price:* Little Science, big Science. Columbia University Press 1963.
[2] *Bertaux Pierre:* Mutation der Menschheit, Scherz Verlag 1963.
[3] Great Ages of Man. Time-Life Book Series.
[4] *U. Eco* and *G. B. Zorzolli:* The Picture History of Inventions. New York 1963, Macmillan.
[5] *Singer, Holmyard, Hall* and *Williams:* A History of Technology. University Press 1958.
[6] «Futures», Vol. 1, No. 4, June 1969, p. 341.
[7] *F. Baade:* Der Wettlauf zum Jahr 2000.

Zur Optimierung und Regelung von elektrischen Verbundnetzen unter Einsatz von Prozessrechnern

DK 621.311.1:681.31

Von **H. Bühler**, Ciona di Carona

1. Einleitung

Ein interessantes Anwendungsgebiet für die modernen Optimierungsverfahren und den Einsatz von Prozessrechnern stellt der Betrieb von grossen elektrischen Verbundnetzen dar. Hier ist die Energieproduktion in den einzelnen Kraftwerken so zu steuern, dass die Kosten für die Energieproduktion minimal werden. Beim Verbundbetrieb von hydraulischen und thermischen Kraftwerken kann man mehrere einander übergeordnete Optimierungsstufen unterscheiden und zwar:

- Langzeit-Optimierung
- Mittelzeit-Optimierung
- Kurzzeit-Optimierung
- Momentan-Optimierung

Die Langzeit-Optimierung erstreckt sich über ein Jahr, wobei der voraussichtliche Wasserhaushalt so eingeteilt wird, dass die in den thermischen Kraftwerken zu erzeugende Energie mit minimalen Kosten produziert werden kann. Die Mittelzeit-Optimierung umfasst einen Zeitraum von einer Woche bis einen Monat. Es werden die Ergebnisse der Langzeit-Optimierung den laufenden Verhältnissen angepasst und bestimmt, welche Kraftwerke zu welchen Zeitabschnitten in Betrieb zu nehmen sind. Bei der Kurzzeit-Optimierung wird das Betriebsprogramm für den folgenden Tag festgelegt, und zwar so, dass die voraussichtliche Last optimal auf die einzelnen Kraftwerke verteilt wird, das heisst, dass die Produktionskosten minimal werden. Bei der Momentan-Optimierung wird die Leistung der einzelnen Kraftwerke so beeinflusst, dass die Produktionskosten in jedem Moment minimal sind.

Die Momentan-Optimierung als Netzregelung ist im «On-line»-Betrieb, das heisst prozessgekuppelt mit einem Prozessrechner durchzuführen. Die anderen, übergeordneten Optimierungsstufen können dagegen «Off-Line», das heisst unabhängig vom Prozess berechnet werden. Nachstehend wird näher auf Kurzzeit-Optimierung und Momentan-Optimierung, das heisst Netzregelung eingegangen.

2. Kurzzeit-Optimierung

2.1 Die Grundbeziehungen

Wie bereits erwähnt, wird bei der Kurzzeit-Optimierung das Betriebsprogramm für den folgenden Tag festgelegt.

Vorgegeben sind dabei die im Verlauf des Tages in den einzelnen Knotenpunkten des Netzes abgenommenen Verbraucherleistungen und die in den hydraulischen Kraftwerken pro Tag zu verbrauchende Wassermenge. Die letztere wird

von der Mittelzeit-Optimierung vorgegeben, so dass der vorgesehene Wasserhaushalt eingehalten werden kann. Die Leistung ist nun so auf die einzelnen Kraftwerke aufzuteilen, dass die Kosten für die Energieproduktion minimal werden.

Mit Rücksicht auf die numerische Rechnung wird der Tag in n_T gleiche Zeitabschnitte ΔT eingeteilt, zum Beispiel in 24 Zeitabschnitte von je 1 Stunde.

Die Produktionskosten pro Zeiteinheit setzen sich aus einem Grundanteil und einem leistungsabhängigen Anteil zusammen. Die Grundkosten sind bedingt durch Aufwendungen für Amortisierung, Zinsen, Personalkosten usw. und laufen unabhängig von der jeweiligen Produktion auf. Im folgenden sollen unter Produktionskosten nur die leistungsabhängigen Kosten verstanden werden. Diese steigen bei thermischen Kraftwerken etwas mehr als linear an, bedingt durch den Verbrauch an Brennstoffen. Bei hydraulischen Kraftwerken steht das Wasser praktisch kostenfrei zur Verfügung, so dass die Produktionskosten gleich Null sind.

In einem Verbundnetz mit J thermischen Kraftwerken betragen die totalen Produktionskosten pro Tag

$$(1) \qquad F_T = \Delta T \sum_{n=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{J} F_{jn}$$

Es ist dies die Zielfunktion für die Kurzzeit Optimierung.

Da die Produktionskosten F_{jn} pro Zeiteinheit von der produzierten Leistung P_{jn} in den einzelnen thermischen Kraftwerken abhängen, so können die totalen Betriebskosten pro Tag F_T durch geeignete Festlegung der Lastverteilung auf die einzelnen Kraftwerke minimalisiert werden. Dabei sind jedoch eine Reihe von Nebenbedingungen und Begrenzungen zu beachten.

Die pro Tag in jedem hydraulischen Kraftwerk $i = 1 \ldots I$ verbrauchte Wassermenge muss gleich der durch die Mittelzeit-Optimierung vorgeschriebene Wassermenge W_{Ti} sein, das heisst

$$(2) \qquad W_{Ti} = \Delta T \sum_{n=1}^{n_T} W_{in} \qquad i = 1, 2, \ldots, I$$

Als weitere Nebenbedingung besteht die Leistungsbilanz, gemäss der in jedem Zeitabschnitt Produktion minus Verbrauch, minus Verluste gleich Null sein muss, und zwar sowohl für die Wirkleistung P wie auch für die Blindleistung Q, das heisst

$$(3) \qquad \begin{aligned} &\sum_{j=1}^{J} P_{jn} + \sum_{i=1}^{I} P_{in} - \sum_{k=1}^{K} P_{Dkn} - P_{Ln} = 0 \\ &\sum_{j=1}^{J} Q_{jn} + \sum_{i=1}^{I} Q_{in} - \sum_{k=1}^{K} Q_{Dkn} - Q_{Ln} = 0 \\ &n = 1, 2, \ldots, n_T \end{aligned}$$

P_{Dkn} bzw. Q_{Dkn} sind die vorgegebenen Wirk- bzw. Blindlasten in den einzelnen Knotenpunkten k. P_{Ln} bzw. Q_{Ln} sind die totalen Wirk- bzw. Blindverluste im Verbundnetz. Diese ergeben sich je nach der Leistungsverteilung auf den einzelnen Übertragungsleitungen und können mit Hilfe einer Netzberechnung bestimmt werden.

Schliesslich ist zu beachten, dass die erzeugbaren Wirk-, Blind- sowie Scheinleistungen nach unten und oben begrenzt sind, das heisst

$$(4) \qquad \begin{aligned} \check{P} &\leq P \leq \hat{P} \\ \check{Q} &\leq Q \leq \hat{Q} \\ \check{S} &\leq S \leq \hat{S} \end{aligned}$$

Weiteren Begrenzungen sind die Spannungen in den einzelnen Knotenpunkten k unterworfen, mit Rücksicht auf eine befriedigende Spannungshaltung im Netz, das heisst

$$(5) \qquad \check{U}_k \leq U_k \leq \hat{U}_k$$

Damit die Erwärmung der Übertragungsleitungen einen zulässigen Wert nicht überschreitet, ist auch die maximal übertragbare Leistung auf einer Leitung begrenzt. Mit guter Näherung kann diese Begrenzung durch eine Begrenzung der Phasenwinkeldifferenz $\Theta_k - \Theta_\varkappa$ der Spannungszeiger zwischen Anfang und Ende der Leitung ersetzt werden, das heisst

$$(6) \qquad -\hat{\Theta}_{k\varkappa} \leq \Theta_k - \Theta_\varkappa \leq \hat{\Theta}_{k\varkappa}$$

2.2 Die Lösung des Optimierungsproblems

Die Lösung des vorstehend aufgestellten Optimierungsproblems ist sehr mühsam und umfangreich, vor allem da sich die unabhängigen und abhängigen Variablen nicht nur über die einzelnen Kraftwerke bzw. Knotenpunkte erstrecken, sondern auch über alle Zeitabschnitte.

Es ist daher zweckmässig, die Rechnung in einzelne Schritte aufzuteilen, wodurch die Übersicht verbessert und auch die Programmierung vereinfacht wird. Ein generelles Strukturdiagramm ist in Bild 1 dargestellt.

Vorerst wird eine geeignete Annahme über die Verteilung der erzeugten Wirk- und Blindleistung getroffen (1). Die nächsten zwei Rechenschritte werden für jeden einzelnen Zeitabschnitt getrennt durchgeführt. Damit ist eine wesentliche Reduktion der pro Rechenschritt zu berücksichtigenden Variablen möglich.

Zuerst wird die Netzberechnung durchgeführt (2), woraus sich die Wirk- und Blindverluste im Netz ergeben. Anschliessend folgt eine Blindleistungs-Optimierung (3). Dabei werden die erzeugten Blindleistungen Q derart verändert, dass die Wirkleistungsverluste P_L im Netz minimal werden. Aufgrund der Netzberechnung lassen sich für die Wirkleistungsverluste Näherungsbeziehungen angeben.

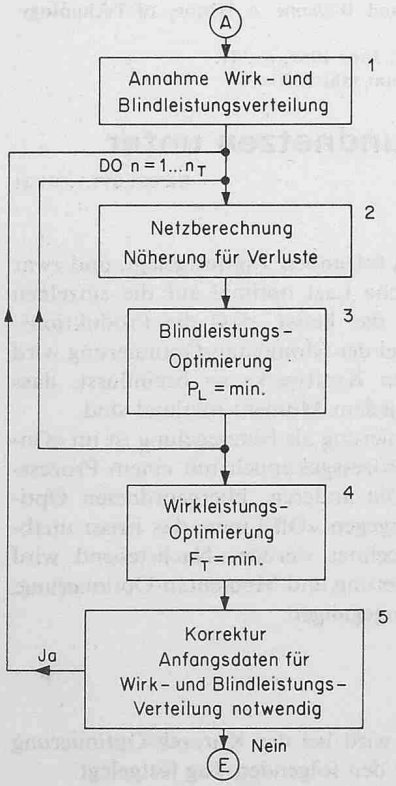

Bild 1. Generelles Strukturdiagramm für die Kurzzeit-Optimierung
DO $n = 1 \ldots n_T$ über alle Zeitabschnitte zu berechnen
P_L Wirkverluste im Netz
F_T totale Produktionskosten

Anschliessend folgt die Wirkleistungs-Optimierung, bei der die erzeugten Wirkleistungen so verändert werden, dass die gesamten Produktionskosten F_T minimal werden (4). Erst bei diesem Schritt sind sämtliche Zeitabschnitte gleichzeitig zu beachten. Da aber Netzberechnung und Blindleistungs-Optimierung schon vorweg erledigt wurden, verringert sich der Rechenaufwand an dieser Stelle.

Schliesslich wird kontrolliert, ob das gefundene Optimum stark von den Anfangsdaten für Wirk- und Blindleistungsverteilung abweicht (5). Wenn ja, so sind die Näherungsbeziehungen für die Verluste ungenau. Die Anfangsdaten werden dann korrigiert, das heisst gleich den zuletzt gefundenen optimalen Werten gesetzt und die Rechnung erneut durchgeführt.

3. Netzregelung

3.1 Optimierung von kleinen Abweichungen

Das Verbundnetz kann nicht unmittelbar nach dem Programm der Kurzzeit-Optimierung betrieben werden, da immer mehr oder weniger kleine Abweichungen von der vorausgesetzten Belastung durch die Verbraucher vorhanden sind. Trotz diesen Abweichungen muss die zu erzeugende Leistung so auf die einzelnen Kraftwerke aufgeteilt werden, dass der Betrieb in jedem Zeitpunkt optimal ist. Diese Aufgabe muss durch die Netzregelung übernommen werden.

Es könnte das in Abschnitt 2 beschriebene Optimierungs-Verfahren, auf einen Zeitabschnitt beschränkt, angewendet werden, wobei diese Rechnung in kurz aufeinanderfolgenden Zeitpunkten zu wiederholen ist. Diese Rechnungen sind in einem Prozessrechner im «On-line»-Betrieb durchzuführen. Der Rechenaufwand wird so jedoch recht beträchtlich sein.

Da es sich aber um relativ kleine Abweichungen von einem bereits berechneten optimalen Betriebspunkt handelt, ist es angebracht, ein Näherungsverfahren anzuwenden, mit dem die notwendigen Korrekturen ohne grossen Aufwand berechnet werden können. Nachfolgend soll das Näherungsverfahren kurz für die Wirkleistungs-Optimierung dargelegt werden.

Aufgrund der Kurzzeit-Optimierung kann für jedes hydraulische Kraftwerk ein Kostenbewertungsfaktor ζ_i bestimmt werden, der entsprechend der verbrauchten Wassermenge fiktive Produktionskosten festlegt. Für kleine Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt der Kurzzeit-Optimierung ist dann das Funktional

$$(7) \qquad \Delta F = \sum_{j=1}^{J} \Delta F_j + \sum_{i=1}^{I} \zeta_i \Delta W_i$$

zu minimalisieren. Dabei ist als Nebenbedingung die Abweichung der Wirkleistungsbilanz

$$(8) \qquad \sum_{j=1}^{J} \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_j}\right) \Delta P_j + \sum_{i=1}^{I} \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}\right) \Delta P_i - \Delta P_D = 0$$

zu beachten. ΔP_D ist die gesamte Wirklaständerung im Verbundnetz. $\partial P_L/\partial P_j$ bzw. $\partial P_L/\partial P_i$ berücksichtigt näherungsweise die Änderung der Wirkverluste P_L bei einer Änderung der erzeugten Leistungen ΔP_j bzw. ΔP_i. Überdies sind noch die in Abschnitt 2.1 angegebenen Begrenzungen einzuhalten.

Wird für ΔF_j bzw. ΔW_i ein quadratischer Ansatz von der Form $a_0 + a_1 \Delta P + a_2 \Delta P^2$ gewählt, so lässt sich die optimale Änderung von ΔP_j bzw. ΔP_i in Abhängigkeit von ΔP_D sehr leicht berechnen.

Die totale Wirklaständerung ΔP_D wird zweckmässigerweise indirekt bestimmt und zwar aus

$$(10) \qquad P_D = \frac{1}{T_i} \int (K_f \Delta f + \Delta P_A)\, dt$$

das heisst aus dem Regelsignal, das üblicherweise bei der Frequenz-Leistungsregelung verwendet wird. Δf ist die Frequenzabweichung und ΔP_A ist die Abweichung der Austauschleistung mit einem Nachbarnetz vom vorgeschriebenen Wert.

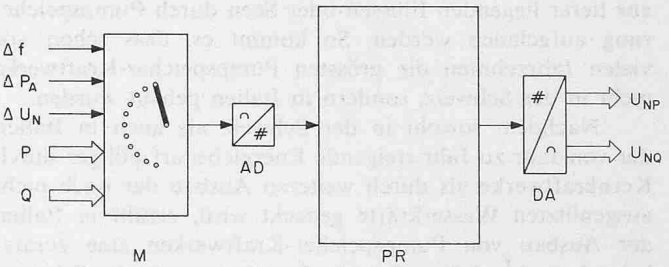

Bild 2. Schematische Darstellung der gerätetechnischen Anordnung eines Prozessrechners in einem Lastverteilzentrum

M Multiplexer *PR* Prozessrechner
AD Analog-Digital-Wandler *DA* Digital-Analog-Wandler

Damit die Netzregelung mit dem Prozessrechner stabil ist, muss der Regelalgorithmus noch zusätzliche Terme zur Stabilisierung aufweisen.

Analoge Näherungsbeziehungen lassen sich auch für die optimale Blindlastverteilung aufstellen. Hier wird die Änderung der Blindlast indirekt aus der Änderung der Netzspannung ΔU_N bestimmt.

3.2 Der Prozessrechner im Lastverteilzentrum

In Bild 2 ist die gerätetechnische Anordnung eines Prozessrechners in einem Lastverteilzentrum schematisch dargestellt. Alle für die Netzregelung benötigten Grössen (Frequenzabweichung Δf, Abweichung der Austauschleistung ΔP_A, Abweichung der Netzspannung ΔU_N, sowie erzeugte Wirk- und Blindleistungen P bzw. Q) werden mittels Fernübertragung an ein Lastverteilzentrum übertragen. Dort werden alle Grössen durch einen Multiplexer M in periodischen Abständen abgetastet. Ein Analog-Digital-Wandler AD bewirkt eine Umwandlung der analogen Grössen in digitale Form, die dem Prozessrechner zugeführt werden.

Der Prozessrechner PR führt die in Abschnitt 3.1 angegebenen Rechnungen durch und gibt die Stellgrössen U_{NP} und U_{NQ} aus. Diese werden in einem Digital-Analog-Wandler DA in analoge Grössen umgewandelt, die mittels Fernübertragung an die einzelnen Kraftwerke übertragen werden. Dort greifen die Stellgrössen im Prinzip in den Drehzahl- bzw. Spannungseinsteller der Turbinen- bzw. Generatorregelung ein und beeinflussen die erzeugten Wirk- und Blindleistungen.

Im Sinne einer integrierten Datenverarbeitung können dem Prozessrechner ausser der Netzregelung noch weitere Aufgaben wie Protokollierung, Energieabrechnung mit Partner-Werken usw. übertragen werden. Ebenso kann der Prozessrechner auch die Kurzzeit-Optimierung, wie auch Mittel- und Langzeit-Optimierung übernehmen.

Adresse des Verfassers: *H. Bühler*, El.-Ing. SIA, 6914 Ciona di Carona TI.

Ausbau der Pumpspeicher-Kraftwerke in Italien

Von **T. Stein**, dipl. Ing. ETHZ, Vicenza/Italien DK 621.221.4

Die Speicherseen der Wasserkraftwerke werden in der Schweiz vom Wasserzufluss durch Niederschläge aus höher liegenden Gebirgszügen und durch Schneeschmelze aus den Gletschern gespeist. In Italien gibt es im Norden im Alpengebiet und bis in den Süden in den Apenninen zahlreiche hügelige Gelände, in denen sich mit geringen Baukosten durch Staumauern geringer Höhe und Länge grosse Speicherseen bilden lassen, denen aber ein reichlicher Wasserzufluss aus höher liegenden Gebirgszügen fehlt. Diese Speicherseen lassen sich deshalb zur Krafterzeugung nur verwenden, wenn sie zu Zeiten, in denen die verfügbaren Wassermengen grösser sind als die in den Wasserturbinen zur Deckung des jeweiligen Bedarfs gebrauchten,