

Entwicklung eines multifunktionalen Talsperrenbewirtschaftungsmodells bei unsicheren Rahmenbedingungen: Fallstudie für die Talsperren des östlichen Nilbeckens im Sudan

Developing a Multi- Purpose Reservoir Operating Model with Uncertain Conditions: A case of Eastern Nile Reservoirs-Sudan

Dissertation

eingereicht an der

Fakultät Bauingenieurwesen der

Technischen Universität Dresden

Von

Mohammed Abdallah Hamadnaallah Abdallah (MSc)

Geboren am 16.10.1979 in Elkamlin, Sudan

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

TU Dresden

Prof. Dr.sc.tech. Peter Rutschmann

TU München

Dresden, November 2013

Abstract

Developing an efficient, practical, reliable reservoir operation policy is one of the most challenging tasks in water resources systems studies for several reasons, such as big number of involved parameters, typical nonlinearity of reservoir's optimization problem, and last but not least; the associated uncertainty of system parameters. Furthermore, while the research community continues to explore different scientific approaches that can handle this problem satisfactorily, the question of reliability and how to fill the gap between researchers and practitioners remains. In other words, how can these research's outputs be translated into simple, reliable, applicable figures that could be applied easily by the system managers in the field?

To address these issues; the aim of this research is to investigate and develop a Reservoir-Simulation-Uncertainty-Parameterization-Optimization (RSUPO) method based on the idea of using the most advanced and effective techniques to model the system appropriately while preserving simplicity in terms of applicability, without affecting the system's representation reliability. Different reservoir simulation, uncertainty, optimization techniques have been revised previously, but this state-of-the-art review shows the competence of fuzzy systems in terms of modelling uncertainty attributed to imprecision, which is a typical reservoir operation problem, taking advantage of a fuzzy system that allows involving the expert's opinions and transferring the linguistic terms to mathematical form.

On the other hand, to avoid the complexity and dimensionality problem of large nonlinear reservoir optimization problem; two strategies have been adopted; The first strategy is to reduce the number of involved parameters without affecting the reliability of the system's representation through parameterization of reservoir operation rules. The second strategy is to use Swarm Intelligence optimization technique, which shows a high degree of competence in dealing with such problems through simplifying the optimum solution searching procedures by mimicking the organism's social behaviour.

These concepts have been formulated and applied in the Eastern Nile river system in Sudan, which has three reservoirs; two in series of Sennar and Roseires at the Blue Nile and Girba reservoir at the Atbara river. All of them were built and designed as multipurpose reservoirs to supply the irrigation schemes, power generation, and to maintain downstream flows in addition to contributing in flood protection. Additionally, all reservoirs experience various problems such as decreasing storage capacity due to sediment accumulation, compromising different purposes, and data availability which makes proper reservoir operation questionable.

Accordingly, reservoir water balance components including inflow, evaporation, and losses have been analysed systematically for the three reservoirs. To handle the inflow uncertainty; Blue Nile and Atbara river flow have been modelled using ARMA (1,1) in addition to improving the reservoir's evaporation calculation by using the Penman-Monteith approach to compute the irrigation and domestic demands. To represent the effect of reservoir sedimentation; a simple model has been developed and verified. Accompanying this model; the results of flow, evaporation, and demands modelling have been verified using reservoir water balance simulation.

To develop the fuzzy rule based model; the outputs of improved water balance as well as personal interviews with systems managers and experts, have been used to design the membership functions for the reservoirs inflow, storage, and release. A fuzzy inference system (FIS) has been developed using each reservoir's operating rules, and an inflow statistical analysis including the future climate change impacts in addition to comprehensive sedimentation analysis to determine the accurate real time reservoirs' capacities. To design the required reservoir releases; different demands need to be supplied from reservoirs taking into account the current situation and future scenarios in terms of irrigation projects extension.

The model results show a real improvement in hydropower generation in all reservoirs compared to the generated power from current operation policies. To check the model reliability; values of shortage probability and percentages have been calculated where the model shows good performance in producing the low shortage probability while satisfying the system's demands.

Using the outputs of fuzzy models; three dimensional modelling system has been applied to extract the coefficients those correlated inflow, storage, and release. Two approaches have been applied in parameterization process namely; the reservoir hedging PSO-HDG and reservoir zone discretization PSO-ZONE, for both of them the linear polynomials models have been developed and tested, therefore, it has been applied accordingly to extract the a, b , and m coefficients in case of PSO-HDG and k hedging fractions coefficients values in PSO-ZONE where each reservoir of Sennar, Roseires, and Girba has been discretized into five zones. Three goodness-of-fit statistics of R^2 , adjusted R^2 , and $RMSE$ have been applied in addition to residual analysis to check the fitting quality and model performance where the first PSO-HDG polynomials model shows a very good results in most cases as well as the PSO-ZONE even with the existence of some weak correlations which have been justified mainly due to the scarcity of bathymetric survey data which affects the accuracy of updating the reservoir's real state storage.

The results indicate the feasibility of both parameterization models and opportunity of applying them satisfactorily using the simplicity advantage of the first one which can help in having a good general reservoir operation parameters while the second PSO-ZONE offers more insight into the reservoir's system based on the real storage's state conditions, particularly when real time reservoir's release decision is required, however, this approach is not simple comparing to the first one and needs more data besides its sensitivity to the discretization type.

After verifying both models; the coefficients ranges have been determined within 95% confidence interval in order to cover the most likely situations besides using them as constraints in optimization process where Swarm Intelligence technique mainly the Particle Swarm Optimization model has been developed and verified using seven of most known benchmark functions. The results reflect the capability of model to find the global optimum solution with a few computational efforts; therefore, the model has been extended to solve two reservoir optimization functions based on PSO-HDG and PSO-ZONE model. The objective of both functions is to minimize the square difference between system demands and reservoir releases. Four simulation periods for Sennar, Girba, and five for Roseires reservoir each one of them contains 72 months; have been designed based on bathymetric survey data availability to ensure the most storage estimation accuracy. Both optimization models show a high tendency to keep water for longer time and distribute the shortage through the year in a better way than applied nonlinear operation policy. Three performance measures of reliability, resilience, and vulnerability have been applied to check the model.

Kurzfassung

Die Entwicklung einer effizienten, praktikablen und zuverlässigen Talsperrenbewirtschaftungsstrategie ist eine der schwierigsten Aufgaben auf dem Gebiet wasserwirtschaftlicher Systemstudien. Ursachen dafür sind z.B. die Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter, das üblicherweise nichtlineare Verhalten des Speicheroptimierungsproblems sowie die darin enthaltenen Unsicherheiten der Systemparameter. Während aktuell verschiedene wissenschaftliche Ansätze verfolgt werden, um das Problem zufriedenstellend zu lösen, bleiben die Fragen nach der Zuverlässigkeit dieser Ansätze sowie nach der Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse in der Praxis bestehen. Anders ausgedrückt besteht die Notwendigkeit, die Ergebnisse der wissenschaftlichen Ergebnisse in einfache, zuverlässige und praktikable Methoden zu überführen, die von den Entscheidungsträgern in der Praxis leicht einzusetzen sind.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieser Arbeit, eine integrative Methode (Speichervolumen, Simulation, Unschärfe, Parametrisierung, Optimierung - RSUPO) zu entwickeln und zu untersuchen, die auf der Verwendung der fortschrittlichsten und effektivsten Modellierungstechniken basiert und dabei sowohl anwenderfreundlich ist als auch eine hinreichend zuverlässige Beschreibung des Systemverhaltens ermöglicht. Dafür werden zunächst verschiedene, bestehende Talsperrenbewirtschaftungs-, Unschärfeerfassungs- und Optimierungsstrategien getestet. Die Überprüfung des aktuellen Forschungsstands bestätigt die besondere Eignung von Fuzzy-Systemen im Hinblick auf die Modellierung von Unsicherheiten infolge unscharfer Eingangsdaten, was für die Talsperrenbewirtschaftung ein typisches Problem darstellt. Über Fuzzy-Systeme können Expertenmeinungen einbezogen und linguistische in mathematische Terme überführt werden.

Um die Probleme der hohen Komplexität und Dimensionalität der nichtlinearen Optimierung eines Speicherbewirtschaftungskonzepts zu umgehen, werden zwei hauptsächliche Strategien verfolgt: Zunächst ist die Anzahl der integrierten Parameter zu reduzieren, ohne dass die Zuverlässigkeit der Systemabbildung durch die parametrisierten Bewirtschaftungsregeln beeinträchtigt wird. Die zweite Strategie ist die Verwendung Kollektiver-Intelligenz-Optimierungstechniken, die eine hohe Eignung bezüglich der Transformation solcher Fragestellungen in vereinfachte, optimierte Lösungsalgorithmen besitzen, in dem sie das soziale Verhalten von Organismen nachahmen.

Diese Konzepte werden für das Fließgewässersystem des östlichen Nilbeckens im Sudan formuliert und angewendet. Das Flusssystem besitzt in diesem Gebiet drei Speicherbecken: am Blauen Nil die beiden direkt hintereinander liegenden Talsperren Sennar und Roseires sowie das Girba Staubecken am Atbara Fluss. Alle drei wurden als Mehrzweckspeicher geplant, gebaut und sollen vorrangig der Bewässerung sowie der Energieerzeugung dienen, jedoch auch Aspekte der Mindestwasserabgabe und des Hochwasserschutzes berücksichtigen. Die damit verbundenen Schwierigkeiten (z.B. die zunehmende Verlandung des Stauraums), die fallweise konträren Bewirtschaftungsziele sowie eine mangelhafte Datenverfügbarkeit führen dazu, dass sich die Formulierung einer korrekten und zuverlässigen Bewirtschaftungsstrategie für diese Anlagen als schwierig gestaltet.

Um dies zu erreichen, müssen zunächst die Wasserhaushaltskomponenten Zufluss, Evaporation und Verluste systematisch für die drei Talsperren analysiert werden. Um die Zuflussunsicherheiten einschätzen zu können, werden mit Hilfe von ARMA (1,1) die Abflüsse des Blauen Nils und des Atbara Flusses simuliert. Zur verbesserten Abschätzung der Evaporationsmenge wird das Penman-Monteith Näherungsverfahren verwendet, womit auch der Wasserbedarf für Bewässerungs- und domestische Zwecke berücksichtigt werden kann. Für die Simulation von Sedimentationseffekten wird ein einfaches Modell entwickelt und verifiziert. Parallel dazu werden die Ergebnisse der Abfluss-, Evaporations- und der Wasserbedarfsmodellierung mit Hilfe einer reservoirbezogenen Wasserhaushaltssimulation überprüft. Um ein auf Unschärfe basierendes Modell zu entwickeln, finden sowohl die Ergebnisse der überarbeiteten Wasserhaushaltsbilanzierungen als auch die Informationen, die aus persönlichen Gesprächen mit Anlagenbetreibern und Experten zusammengetragen worden sind, Eingang in die Überlegungen. Auf dieser Grundlage werden Zugehörigkeitsfunktionen für den Zufluss, die Speicherung und die Abgabe entwickelt. Innerhalb des erarbeiteten Fuzzy-Inferenzsystems (FIS) werden sowohl sämtliche

Betriebsvorschriften der Anlagen, als auch die Ergebnisse der statistischen Zuflussanalysen berücksichtigt. Zusätzlich werden die Einflüsse des prognostizierten Klimawandels und die Ergebnisse einer umfassenden Sedimentationsanalyse einbezogen, um akkurate Echtzeitprognosen bezüglich der Speichervolumenentwicklung erstellen zu können. Um die notwendigen Abgabemengen festlegen zu können, müssen die jeweiligen Anforderungen an die Talsperren einbezogen werden, wobei sowohl die aktuellen Verhältnisse als auch zukünftige Entwicklungen (z. B. infolge der Ausweitung von Bewässerungsprojekten) berücksichtigt werden müssen. Die Simulationsergebnisse weisen für alle Talsperren ein erhebliches Steigerungspotenzial im Bereich der Wasserkraftnutzung aus, verglichen mit der derzeit erzielten Leistung.

Zur Prüfung der Zuverlässigkeit des Modells werden auch Szenarien bei mangelndem Wasserdargebot berechnet, wobei das Modell auch dafür und unter Einbeziehung der sonstigen Systemanforderungen seine Eignung bestätigt.

Unter Verwendung der Ergebnisse aus den Fuzzy-Modellen wird ein dreidimensionales Modellsystem angewendet, um die relevanten Koeffizienten für den Zufluss, die Speicherung und die Abgabe zu ermitteln. Dabei werden zwei Ansätze innerhalb des Parametrisierungsprozesses untersucht: das „Reservoir -Hedging (PSO-HDG)“ und die „Reservoir Zonen Diskretisierung (PSO-ZONE)“. Für beide Verfahren werden lineare Polynommodelle entwickelt und getestet. Damit werden die a, b und m-Koeffizienten für den Fall des PSO-HDG-Ansatzes bzw. die k Hedging-Fraktionskoeffizienten für den Fall des PSO-ZONE-Ansatzes ermittelt. Dafür werden die Speicherbecken von Sennar, Roseires und Girba jeweils in fünf Zonen diskretisiert. Neben der üblichen Residuenanalyse werden drei „Goodness-of-fit“-Statistiken (R^2 , angepasstes R^2 und die Methode der kleinsten Fehlerquadrate) angewendet, um die Anpassungs- und Prognosefähigkeit des Modells zu überprüfen. Dabei zeigen das erste PSO-HDG-Polynommodell sowie das PSO-ZONE-Modell für die meisten Fälle eine sehr gute Übereinstimmung. Dies gilt selbst bei Vorhandensein schwacher Korrelationen, welche hauptsächlich infolge des Mangels an Bathymetrie-Daten eingetragen worden sind. Dadurch wird auch die Genauigkeit der Prognosen zur Speicherkapazitätsentwicklung beeinflusst.

Die Ergebnisse bestätigen die Anwendbarkeit beider Parametrisierungsmodelle. Während das erste Modell aufgrund seiner Einfachheit Vorteile hinsichtlich der Einbeziehung der Speicherbewirtschaftungsparameter besitzt, ermöglicht der zweite Ansatz einen detaillierteren Einblick in das Systemverhalten, basierend auf den aktuellen Zustandsparametern der Talsperre. Dies gilt insbesondere, wenn eine Entscheidung bezüglich einer Abgabe aus dem Speicherbecken getroffen werden muss. Allerdings ist dieser Ansatz verglichen mit dem ersten komplizierter, setzt eine höhere Datenverfügbarkeit voraus und weist eine stärkere Sensitivität bezüglich der Diskretisierungsart auf.

Im Ergebnis der Verifizierung beider Modelle konnten die 95%-Konfidenzintervalle der relevanten Koeffizienten bestimmt werden. Dadurch werden die häufigsten Speicherbeckenzustände weitestgehend abgedeckt. Darüber hinaus werden die Parameterintervalle als Randbedingungen innerhalb des Optimierungsprozesses mit Hilfe des Schwarmintelligenzansatzes (hauptsächlich „Particle Swarm Optimization“) verwendet. Bei der Ansatzentwicklung wurden sieben der am häufigsten verwendeten Benchmark-Funktionen eingesetzt. Die Ergebnisse bestätigen die Fähigkeit des Modells, mit relativ geringem Rechenaufwand ein globales Optimum zu identifizieren. Aus diesem Grund wurde das Modell zusätzlich erweitert, um zwei Speicheroptimierungsfunktionen unter Verwendung der PSO-HDG- und PSO-ZONE-Ansätze zu lösen. Ziel beider Funktionen ist die Minimierung des Fehlerquadrats aus den Systemanforderungen (Wasserbereitstellung) und den Speicherabgaben. Darauf abzielend, die höchste Genauigkeit bezüglich der Speicherkapazitätsprognose zu erreichen, wurden auf Basis verfügbarer Bathymetrie-Daten vier Simulationsszenarien für Sennar und Girba sowie fünf Szenarien für das Roseires Speicherbecken entwickelt, wobei sich die Zeiträume jeweils über 72 Monate erstrecken. Beide Optimierungsmodelle zeigen eine starke Tendenz, das Wasser länger zu speichern und Wassermangelperioden über das Jahr besser zu verteilen als das angewandte nichtlineare Betriebsregime. Drei Bewertungsmaßstäbe bezüglich der Zuverlässigkeit, der Belastbarkeit und der Vulnerabilität wurden angewendet, um das Modell zu überprüfen.