Höhere Versorgungssicherheit durch Netzkupplungstransformator

Autor(en): **Aschwanden, Thomas / Jaeggi, Franz**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **97 (2006)**

Heft 9

PDF erstellt am: **02.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857676

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Höhere Versorgungssicherheit durch Netzkupplungstransformator

400-MVA-Transformatorengruppe mit Längs- und Querregelung

Die Verstärkung der 380/132-kV-Netzkupplung in der Unterstation Bassecourt mit einem 400-MVA-Transformator verbessert die Versorgungsqualität in den Kantonen Basel und Jura sowie in der Westschweiz. Die direkte Netzkupplung zwischen dem 380-kV-Verbundnetz und der Ebene des überregionalen 132-kV-Verteilnetzes entlastet die bestehende 380/220-kV-Transformierung in Bassecourt und erhöht dadurch die Übertragungskapazität an der Schweizer Grenze. Ausserdem reduziert sie die Transformierungsverluste – eine zukunftsgerichtete und kostengünstige Lösung. Der neue Netzkupplungstransformator bringt im überregionalen Verteilnetz dank Längs- und Querregelung zwei wesentliche Vorteile: eine optimale Spannungshaltung und eine gezielte Lastflusssteuerung.

Da der Elektrizitätsbedarf der Schweiz weiterhin zunimmt, besteht in diversen Bereichen des schweizerischen Verbundnetzes (Spannungsebenen 380 kV und 220 kV) ein Bedarf an zusätzlicher Übertragungs- und Transformierungskapazität. Neben den bekannten Engpässen auf der Nord-Südachse ist infolge der Öffnung der internationalen Strommärkte auch eine steigende Nachfrage nach West-Ost-Verbindungen zu beobachten. Ein wichtiger Netzknoten für den Energieaustausch mit Frankreich ist die Unterstation (UST) Bassecourt der BKW FMB Energie AG (BKW) im Jura in unmittelbarer Nähe der Landesgrenze. In der 380-kV-Schaltanlage dieser Unterstation sind neben den 380-kV-Verbindungen zu den wichtigen Knoten Laufenburg und Bickigen des schweizerischen Verbundnetzes zwei 380-kV-Leitungen des französischen EDF-Netzes (UST Mameblin und Sierentz) angeschlossen.

Thomas Aschwanden, Franz Jaeggi

Unterstation Bassecourt

Bild 2 gibt eine Übersicht der heute in der Unterstation Bassecourt existierenden Spannungsebenen und Transformierungen. Im Zusammenhang mit dem Energieaustausch mit Frankreich betreibt die BKW seit 1973 eine 400-MVA-Transformatorengruppe in Bassecourt, die das europäische 380-kV-Netz mit dem 220-kV-Landesnetz verbindet [1]. Diese 380/220-kV-Netzkupplung wurde 1988 mit einer zweiten baugleichen 400-MVA-Gruppe verstärkt. Seither wurde die Energieversorgung der Nordwestschweiz, des Jura und der Halbkantone Basel-Stadt und Basel-Land sowie von Teilen des Mittellandes von der 220-kV-Sammelschiene Bassecourt aus via 220/132-kV- und 220/50-kV-Transformatoren durch die überregionalen 132-kV- und 50-kV-Netze sichergestellt.

Die gestiegenen Belastungen und Engpässe im Schweizer Verbundnetz haben gezeigt, dass in einigen wichtigen Punkten des Netzes eine gezielte Verstärkung der Transformierungsleistung notwendig ist. Wie kritisch die Situation in Teilen des Verbundnetzes werden kann, wurde deutlich, als in der Unterstation Bassecourt im Dezember 2001 eine 380/220-kV-Transformatorgruppe durch einen Schadenfall (Isolationsversagen einer Hochspannungsdurchführung) längere Zeit ausser Betrieb war [2]. Als effizienteste und kostengünstigste Massnahme für eine gezielte Erhöhung der Versorgungssicherheit und der Übertragungskapazität hat sich die Verstärkung der Transformierungsleistung im Netzknoten Bassecourt ab der 380-kV-Spannungsebene erwiesen.

Konzept für die Transformierung

Das Konzept, die Transformierungsleistungen in der Unterstation Bassecourt mit 380/132-kV-Transformatoren zu verstärken und damit das überregionale 132-kV-Netz direkt an das 380-kV-Verbundnetz anzubinden, entspricht in der Schweiz – im Gegensatz zu Deutschland – nicht der üblichen Praxis. In Bassecourt

Bild 1 Netzkupplungstransformator mit Längs- und Querregelung in Bassecourt, hier bei der Hochspannungsprüfung nach der Montage

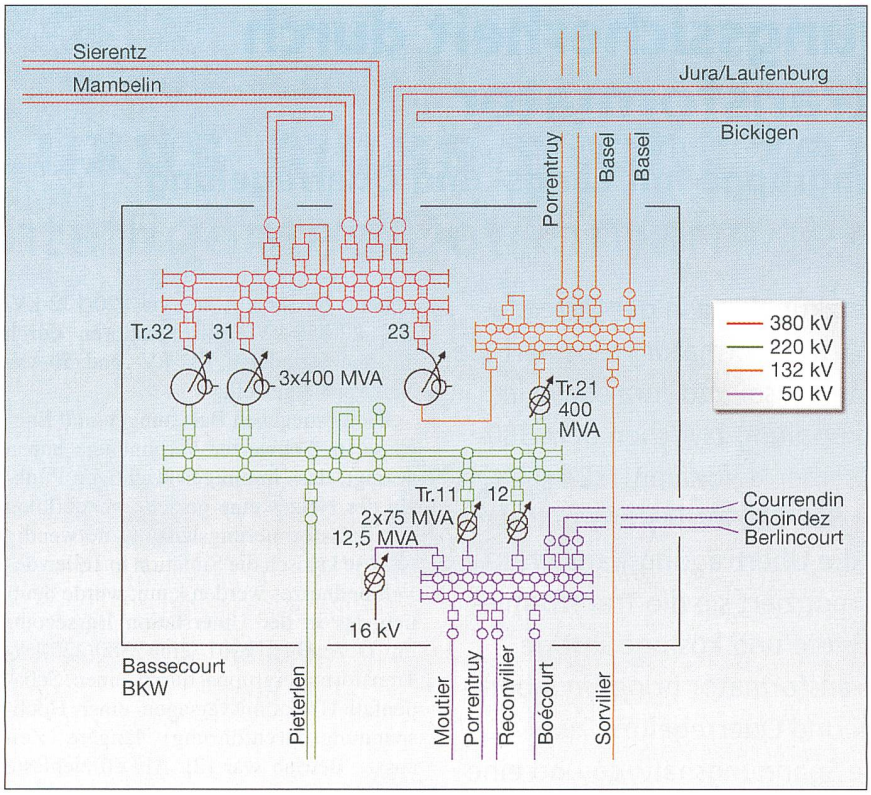


Bild 2 Netzübersicht Unterstation Bassecourt

Netzkupplungen in der UST Bassecourt: 380/132 kV (TR 23) mit Längs- und Querregelung, 380/220 kV (TR 31 und 32) mit Schrägregelung und 220/132 kV (TR 21) mit Längsregelung und 220/50 kV (TR 11 und 12) mit Längsregelung

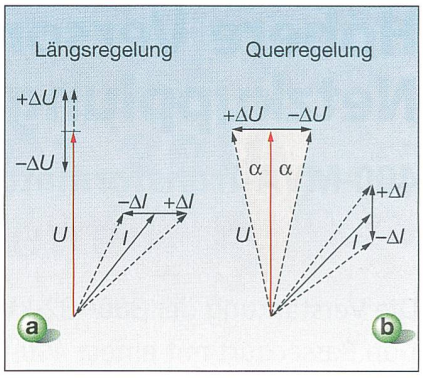


Bild 3 Längs- und Querregelung von Transformatoren (Zeigerdiagramme)

hat eine Verstärkung mit einer 380/132-kV-Transformatorengruppe den Vorteil, dass die bestehende 380/220-kV-Transformierung nicht mehr durch die Regionale Versorgung belastet wird, was die Übertragungskapazität an der Schweizer Grenze wesentlich erhöht. Ein weiterer Vorteil ist, dass auf eine Transformierung in zwei Stufen 380/220 kV und 220/132 kV verzichtet werden kann, was zu einer Reduktion der Transformierungsverluste und der Investitionskosten führt. Längerfristig kann in Bassecourt sogar auf die 220-kV-Netzebene verzichtet werden. Der Ausbau der Transformierungsleistung in Bassecourt um 400 MVA mit einer neuen 380/132-kV-Transformatorengruppe entlastet die teilweise mehr als 40-jährigen Leistungstransformatoren in diesem wichtigen Netzknoten.

Der bestehende 220/132-kV-Transformator (Nr. 21 in Bild 2) dient in diesem Konzept lediglich noch als betriebsbereite Reserve und ist im Normalfall ausser Betrieb. Ein Parallelbetrieb dieses Transformators mit dem neuen Netzkupplungstransformator ist nur in wenigen Betriebspunkten zulässig, weil im parallelen Pfad die 380/220-kV-Transformatoren mit Schrägregelung (Nr. 31 und Nr. 32) in Kaskade mit dem 220/132-kV-Transformator (Längsregelung) geschaltet sind. Im Fall einer solchen Parallelschaltung besteht für diese Transformatoren eine latente Überlastungsgefahr durch Zirkulationsströme, die von der abweichenden Phasenlage der beiden Transformierungspfade hervorgerufen werden.

Längs- und Querregelung

Um beim gewählten Konzept der 380/132-kV-Transformierung in den Wirkleistungsfluss aktiv einzugreifen und damit in bestimmten Netzzuständen unerwünschte Lastflüsse (Transite) vom 380-kV-Verbundnetz durch das 132-kV-Netz zu unterbinden, weist die neue Transformatorengruppe neben einer Längsregulierung zur Beeinflussung der Spannung des 132-kV-Netzes auch eine Querregelung auf, mit der der Wirkleistungsfluss vom 380-kV-Netz zum 132-kV-Netz in weiten Grenzen einstellbar ist [3].

Bei der Längsregelung (Bild 3a) wird eine Veränderung des Übersetzungsverhältnisses durch eine Zusatzspannung ΔU der Regelwicklung bewirkt, die in Phase zur Spannung U der Hauptwicklung, hier die 132-kV-Stammwicklung, liegt. Die übertragene Blindleistung ist dabei der Längskomponente ΔU angenähert proportional. Bei der Querregelung mit einer um 90° quer zur Spannung U der Hauptwicklung liegenden Zusatzspannung ΔU kann die über den Transformator fliessende Wirkleistung vergrössert oder verkleinert werden. Da die so genannte Querspannung ΔU eine Phasenverschiebung (Winkel α) des resultierenden Spannungsvektors gegenüber der Spannung U bewirkt (Bild 3b), werden Transformatoren mit Querregelung auch als Phasenschieber-Transformatoren bezeichnet.

In umfassenden Netzstudien mit allen relevanten Belastungs- und Netzausfallszenarien – das methodische Vorgehen

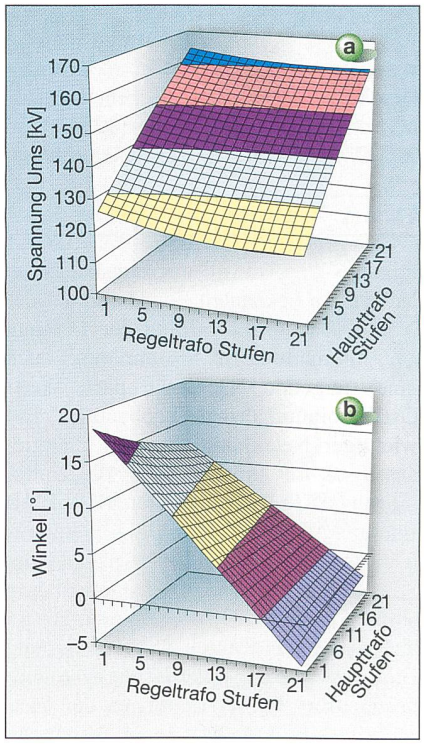


Bild 4 Parameterstudie für die Optimierung des Regelbereichs

(a) zeigt die Spannung auf der 132-kV-Abgangsseite, abhängig von der Schalterstellung im Haupttransformator (Längsregelung). (b) zeigt den Winkel zwischen den Spannungsvektoren (Phasenverschiebung) abhängig von den Schalterstellungen der Querregelung.

wird in [6] beschrieben – wurde der erforderliche Stellbereich für die Längs- und Querregelung definiert. Ein Resultat aus dieser Studie in Bild 4 zeigt, dass sich Wirk- und Blindleistung über die entsprechenden Stufenschalter weitgehend unabhängig voneinander einstellen lassen.

In den Netzstudien stellte sich unter anderem heraus, dass bei einigen wichtigen Netzbetriebsfällen das sonst bewährte Konzept der Schräg-Regelung [3] bei der vorliegenden 380/132-kV-Transformierung nicht genügt, um Überlastungen im 132-kV-Netz zu verhindern.

Durch einen elektronischen Spannungsregler wird die Blindleistung der Transformatorgruppe mit den Stufenschaltern der Längsregulierung automatisch so eingestellt, dass die Spannung im 132-kV-Netz bei Belastungsschwankungen so gut wie möglich gestützt wird. In der Anlage Bassecourt stammt der Istwert für diese automatische Spannungsregelung von der 132-kV-Sammelschiene.

Der Wirkleistungsfluss durch die 380/132-kV-Transformatorgruppe wird von der zentralen BKW-Netzleitstelle in Mühleberg manuell eingestellt; der Stufenschalter im Querregeltransformator ist dazu mit einer Fernsteuerung ausgerüstet.

Tertiärsystem

In der vorliegenden Transformatorschaltung (Bild 5 Mitte) wirkt die im Dreieck geschaltete Tertiärwicklung des Haupttransformators einerseits als Ausgleichswicklung (Kompensation bei unsymmetrischen Fehlern, Reduktion der Nullimpedanz, Reduktion der Oberwellen im Magnetisierungsstrom usw.) und andererseits als Erregerwicklung für die Einspeisung des Querregel-Transformators. Im Sternpunkt geregelte Autotransformatoren weisen wegen dem variablen magnetischen Fluss eine von der Stufenstellung abhängige Tertiärspannung auf. Um diese Tertiärspannung konstant zu halten, ist im Haupttransformatorkessel ein Kompensationstransformator eingebaut (Bild 5 unten).

Als Nennspannung für das Tertiärsystem wurde in Übereinstimmung mit den bestehenden 380/220-kV-Transformatorgruppen 49 kV vorgegeben. Damit bleiben auch bei grösseren Tertiärleistungen die Betriebsströme in diesen Wicklungen in einem günstigen Bereich. Die Nennleistung von 66,4 MVA des 49-kV-Tertiärsystems entspricht 17% der Durchgangsleistung der Transformatorengruppe.

Das Isolationsniveau der Tertiärwicklungen und der dazugehörigen Durchführungen entsprechen der Spannungsreihe 72,5 kV und weisen damit gegenüber der Nennspannung von 49 kV genügend Reserven auf. Dies auch im Hinblick darauf, dass die Tertiärverbindungen zwischen Haupt- und Reguliertransformator in Luft geführt werden. In Anbetracht der grossen Kurzschlusskräfte in den Wicklungen wird das Risiko eines Kurzschlusses im luftisolierten Teil des Tertiärsystems durch eine vertikale Leiteranordnung und grosse Abstände so klein wie möglich gehalten. Bei den in Stern geschalteten Tertiärwicklungen des Querregelungstransformators ist der Sternpunkt herausgeführt.

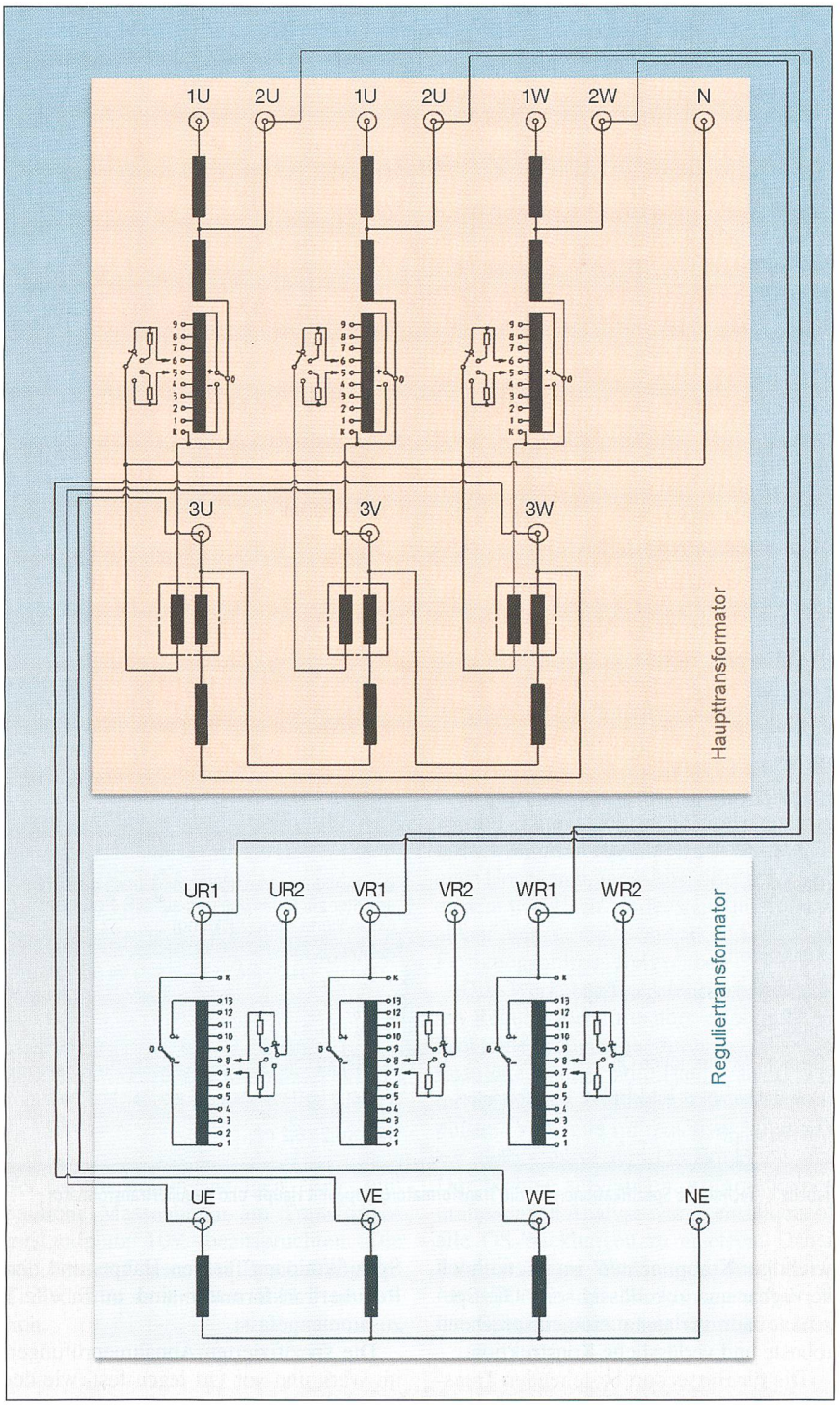


Bild 5 Gruppenschaltbild der 400-MVA-Transformatorgruppe

Technische Spezifikationen

Die technischen Spezifikationen ergeben sich in erster Linie aus Anforderungen des Netzeinsatzes, der Betriebsführung und der Instandhaltung. Netzkupplungstransformatoren müssen als strategisch

Transformatorgruppe	
Durchgangsleistung / Nennleistung	400 MVA
Regelbereich (max. Phasenwinkel bezogen auf Mittenstellung der Längsregelung im Haupttrafo)	±8,5°
OS-Wicklung: Isolationsniveau (U_m)	420 kV
MS-Wicklung: Isolationsniveau (U_m)	170 kV
US-Wicklung (Tertiärsystem): Isolationsniveau (U_m)	72,5 kV
Geräuschpegel mit Lüfter (Schalldruck bei Volllast)	70 dB(A)
Haupttransformator	
Nennleistung	400 MVA
Schaltgruppe	Yna0d11
Nennübersetzungen	400/140 kV ± 9x1,68 kV / 49 kV
Bauart	Autotransformator 3-phasig, OS-Wicklung mit Mittenausgang, Längsregulierung im Sternpunkt, konstante Tertiärspannung
Kühlung	ONAN / ODAF
Kurzschlussspannung ϵ_{cc} [%]	13,1 %
Gewicht Aktivteil (ohne Öl)	238 100 kg
Gewicht komplett aufgebauter Transformator	425 000 kg
Abmessungen l×b×h	14,2×8,3×10,2 m
Reguliertransformator (Querregler)	
Nennleistung	66,4 MVA
Schaltgruppe	III y n
Regelwicklung (MS): Spannungsbereich	(140 ± 9 x 1,68) kV ± j12 x 1,75 kV
Erregerwicklung (Tertiärsystem): Nennspannung	49 kV
Bauart	Zweiwicklungstransformator 3-phasig, Stufenschalter zur Querregelung auf MS-Potenzial (vollisolierte Regelwicklung)
Kühlungsart	ONAN/ONAF
Kurzschlussspannung ϵ_{cc} [%]: Stufe 1 Stufe 25	 2,7% 3,6%
Gewicht Aktivteil (ohne Öl)	55 500 kg
Gewicht komplett aufgebauter Transformator	164 600 kg
Abmessungen	12,4×6,2×8,2 m

Tabelle I Technische Spezifikationen für die Transformatorgruppe mit Haupt- und Reguliertransformator

wichtige Komponenten im Netz hoch verfügbar und zuverlässig sein. Die Spezifikationen verlangen eine entsprechend robuste und verlässliche Konstruktion.

Die für Bassecourt bestehenden Transportlimiten (Bahnprofil) führten bereits im Vorprojekt zum Entscheid, den 400-MVA-Transformator in zwei separaten Kesseln auszuführen. Diese Lösung mit einem dreiphasigen Haupttransformator in Sparschaltung (Autotransformator) und Längsreglung im Sternpunkt sowie mit dem Querregler im eigenen Kessel entspricht den Bedürfnissen des Netzbetriebs hinsichtlich des Regelbereichs, der Flexibilität und der Zuverlässigkeit. Diese Zweikessel-Lösung hat ausserdem den Vorteil, den Haupttransformator auch ohne Querregeleinheit betreiben zu können. Die wichtigsten technischen Spezifikationen für den Haupt- und den Reguliertransformator sind in Tabelle I zusammengefasst.

Die spezifizierten Abnahmeprüfungen im Werk und vor Ort legen fest, wie der Hersteller die vereinbarten Garantiewerte für Leerlauf- und Lastverluste, für die thermische Überlastbarkeit und für die Schalldruckwerte in dafür geeigneten Versuchen nachweisen muss [4]. Dielektrische Prüfungen mit unterschiedlichsten Spannungsbeanspruchungen stellen sicher, dass die Aktivteile keine Schwachstellen in der Isolation aufweisen und dass die Wicklungen und Ausleitungen das spezifizierte Isolationsniveau sowohl in den Einzelobjekten als auch für die gesamte Transformatorgruppe einhalten. Die spezifizierten dielektrischen Prüfungen, die zum grossen Teil der IEC-Norm 60076-3 entsprechen, sind in Tabelle II zusammengefasst.

Der konservative Wert für den Leerlauf-Geräuschpegel von 60 dB(A) in den Spezifikationen hatte zur Folge, dass der magnetische Kreis des Haupttransformators mit einer Nenninduktion von 1,45 Tesla grosszügig ausgelegt wurde. Dadurch erreicht der Transformator einen günstigeren Wert von 82 kW für die Leerlaufverluste. Die spezifizierten Leerlaufverluste in der Querregeleinheit sind geringer (29 kW).

Eine Transformatorengruppe in der vorliegenden Ausführung stellt ein System mit gekoppelten Wicklungen mit einem komplexen Schwingungsverhalten dar. Durch impulsförmige Anregung (Blitzüberspannung) können in solchen Transformatoren hohe Spannungsbeanspruchungen in den OS- und MS-Wicklungen und auch in den Regelwicklungen auftreten. In der Konstruktionsphase werden diese Beanspruchungen mit aufwändigen Simulationsprogrammen zwar berechnet und die Wicklungsauslegung optimiert, die Modellierung dieser komplexen Schwingungsvorgänge ist aber für ausgedehnte Wicklungssysteme mit einer Unsicherheit behaftet. Für den Nachweis der Stossspannungsfestigkeit aller Wicklungen und der gesamten Transformatorengruppe waren deshalb Beanspruchungen mit Normimpulsen (Blitzstoss mit voller und abgeschnittener Welle, Schaltstoss) von positiver und negativer Polarität spezifiziert. Diese Stossprüfungen wurden phasenweise und wo möglich in Max.-, Mittel- und Min.-Position der Stufenschalter durchgeführt (Bild 6).

Mit modernen Systemen zur Messung von Teilentladungen (TE) ist es heute möglich, allfällige lokale Schwachstellen im Isolationssystem des Transformators bei einer länger andauernden Wechselspannungsbeanspruchung zu detektieren, bezüglich der Fehlerursache zu beurteilen und innerhalb des Transformators zu orten [4]. Als Bewertungskriterium für die TE-Messung wurde definiert, dass die gemessene scheinbare Ladung bei der spezifizierten Prüfspannung (Tabelle II) den Wert von 25 pC nicht überschreiten darf. Die TE-Prüfspezifikation sieht ausserdem vor, dass beim Auftreten einer mit der Spannungsbeanspruchung korrelierten TE-Aktivität die Ursachen derselben zwingend abzuklären sind.

In Anbetracht der anspruchsvollen Transporte (Schiff, Bahn, Strasse) mit heiklen Umladevorgängen und der bedeutenden Montagearbeiten nach der Anlieferung der Transformatoren in Bassecourt, waren zusätzliche Massnahmen

Dielektrische Prüfungen im Werk	
Haupttransformator	
Wechselspannungsprüfungen OS/MS/N/US	630/363/325/140 kV (RMS)
Blitzstossprüfung (Voll-/abgeschn. Welle) OS	± 1425/1630 kV, 5 Stösse
Blitzstossprüfung (Voll-/abgeschn. Welle) MS	± 750/860 kV, 5 Stösse
Blitzstossprüfung (Vollwelle) N	± 750 kV je 3 Stösse
Blitzstossprüfung (Vollwelle) US	± 350 kV je 3 Stösse
Schaltstossprüfung OS	± 1050 kV je 3 Stösse
Teilentladungsprüfung	420 kV 5 sec, 315 kV ($1{,}3 \cdot U_m/\sqrt{3}$) 1 h, zulässiger TE-Pegel < 25 pC
Reguliertransformator	
Wechselspannungsprüfung MS/N/US	325 / 140 / 140 kV (RMS)
Blitzstossprüfung (Voll-/abgeschn. Welle) MS	± 750 / 860 kV, 5 Stösse
Blitzstossprüfung (Vollwelle) US	± 350 kV je 3 Stösse
Teilentladungsprüfung	325 kV 5 sec, 109 kV ($1{,}3 \cdot U_m/\sqrt{3}$) 30 min., zulässiger TE-Pegel < 25 pC
Transformatorgruppe	
Blitzstossprüfung (Voll-/abgeschn. Welle) OS	± 1425 / 1630 kV, 5 Stösse
Blitzstossprüfung (Voll-/abgeschn. Welle) MS	± 750 / 860 kV, 5 Stösse
Blitzstossprüfung (Vollwelle) N	± 750 kV je 3 Stösse
Schaltstossprüfung OS	± 1050 kV je 3 Stösse
Teilentladungsprüfung	420 kV 5 sec, 315 kV ($1{,}3 \cdot U_m/\sqrt{3}$) 1h, zulässiger TE-Pegel < 25 pC
Dielektrische Prüfungen vor Ort	
Haupttransformator	
Wechselspannungsprüfung mit Teilentladungsmessung an allen Durchführungen (3-phasige Einspeisung über Tertiärsystem)	291/102/36 kV ($1{,}2 \cdot U_m/\sqrt{3}$), 1h, 60 Hz zulässiger TE-Pegel < 25 pC
Reguliertransformator	
Wechselspannungsprüfung mit Teilentladungsmessung an allen Durchführungen (1-phasige Prüfung der MS-Wicklung mit Serieresonanzanlage)	100 kV ($1{,}2 \cdot 145$ kV/$\sqrt{3}$), 1h, 110 Hz zulässiger TE-Pegel < 25 pC
Transformatorgruppe	
Wechselspannungsprüfung mit Teilentladungsmessung an allen Durchführungen (3-phasige Einspeisung über Tertiärsystem)	291/102/36 kV ($1{,}2\ U_m/\sqrt{3}$), 1h, 60 Hz zulässiger TE-Pegel < 25 pC

Tabelle II Spezifikationen für die dielektrischen Prüfungen im Werk und nach der Montage vor Ort

zur Qualitätssicherung bis und mit Inbetriebnahme nötig. So wurde zur Überprüfung der Montagequalität eine Vor-Ort-Hochspannungsprüfung mit TE-Messung an der fertig montierten Transformatorengruppe in die Prüfspezifikation aufgenommen (Tabelle II, Prüfaufbau in Bild 1). Bereits in den Ausschreibungsunterlagen wurde festgelegt, dass für die TE-Messung sowohl im Werk als auch vor Ort ein computergestütztes Messsystem zum Einsatz kommt, das TE-Impulse statisch erfasst und die Korrelation zwischen den erfassten TE-Impulsen und der Phasenlage der Prüfspannung darstellt [5].

Beschaffungsprozess

Das Budget für die 380/132-kV-Netzkupplung betrug 13 Millionen Franken, wovon die Transformatorengruppe 70%, der Ausbau und die Anpassungen der Hochspannungsanlagen 20% und bauliche Massnahmen am Transformatorstandplatz 10% beanspruchten. Die wichtigsten Phasen der Beschaffung des Transformators sind aus Bild 7 ersichtlich.

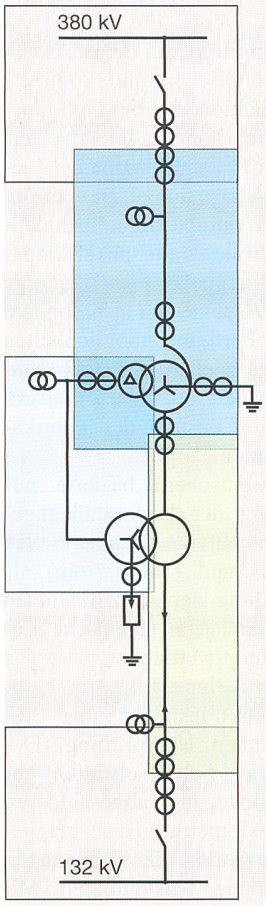
Aufgrund des bedeutenden Beschaffungsvolumens wurde die 400-MVA-Transformatorengruppe auf der Basis von detaillierten technischen und kommerziellen Spezifikationen öffentlich ausgeschrieben. Dabei kam das selektive Verfahren mit einer Präqualifikation der Lieferanten zur Anwendung. Bei dieser Präqualifikation wurden die teilnehmenden Herstellerfirmen (alle aus Europa) bezüglich der allgemeinen fachlichen und kommerziellen Aspekte und insbesondere bezüglich der Fertigungsmöglichkeiten und der Qualitätssicherung (Hochspannungs-Prüffeld) beurteilt. Dazu war ein gut vorbereiteter Besuch der Fabrikationsstandorte unumgänglich.

Der Vergabeentscheid basierte auf einer Bewertung der Lieferantenangebote, wobei sowohl die kommerziellen Kriterien (Preis und Liefertermin) als auch die Erfüllung der Spezifikationen und die vorgeschlagene technische Lösung berücksichtigt wurden.

Nach der Bestellung folgte eine intensive Konstruktionsphase, die mit einer gemeinsamen Überprüfung (Design-Review) der Schlüsselstellen der Transformatorauslegung abgeschlossen wurde: Dimensionierung der magnetischen Kreise, Aufbau der Wicklungen und Hochspannungs-Ausleitungen. Mit diesem wichtigen Meilenstein im Projektablauf wurde die Konstruktion für den Fertigungsprozess freigegeben.

Die Werkabnahme des fertiggestellten Reguliertransformators erfolgte ohne Probleme und ergab durchaus positive Resultate. Einzig beim Haupttransformator ist bei der Prüfung mit Blitzstossimpulsen (Vollwelle mit positiver Polarität) bei einer Phase der OS-Wicklung ein Durchschlag aufgetreten. Aufgrund einer umfassenden Analyse wurde entschieden, alle OS-Wicklungen zu ersetzen. Dabei konnten diese Wicklungen durch eine Modifikation des Wicklungsaufbaus in der Spannungsfestigkeit signifikant ver-

Bild 6 Prüfung der Transformatorengruppe im Werk (ohne Kühler), links der Reguliertransformator, rechts der Haupttransformator



380-kV-Sammelschienenschutz

Für die Betriebssicherheit der 380-kV-Sammelschienen sorgt ein numerischer Sammelschienenschutz mit integriertem Schalterversagerschutz.
Der gerichtete Distanzschutz hat Reservefunktionen mit Überstromschutz und Minimalspannungsüberwachung.

Differenzialschutz für den Haupttrafo

Installiert ist ein schneller Dreiwicklungsdifferenzialschutz. Zusätzlich ist eine ungerichtete Überstromschutzfunktion aktiviert. Der Überstromschutz blockiert im Fehlerfall auch die Stufenschalter des Haupttransformators.

Distanzschutz für 49-kV-Tertiärsystem

Das Schutzrelais schützt die Tertiärwicklungen des Haupttransformators sowie die Erregerwicklung des Reguliertransformators. Die Null- und die Maximalspannungen werden ebenfalls überwacht.

Differenzialschutz 132-kV-Kabel und Hauptwicklung des Regeltrafos

Es ist ein schneller Differenzialschutz aktiv. Die Erregerwicklung des Regeltrafos befindet sich nicht in der Schutzzone dieses Differenzialschutzes.

132-kV-Distanzschutz

Der gerichtete Distanzschutz hat Reservefunktionen mit Überstromschutz und Spannungsüberwachung. Die 132-kV-Sammelschiene ist ebenfalls durch ein System geschützt.

Tabelle III Übersicht der Schutzsysteme für die 400-MVA-Transformatorgruppe

bessert werden. In der Wiederholung der dielektrischen Abnahmeprüfungen hat auch der Haupttransformator alle spezifizierten Prüfungen bestanden.

Schutz- und Überwachungssysteme

Die Transformatorgruppe wird mit Standardschutzrelais geschützt, wobei für alle wichtigen Funktionen eine Redundanz, ein Reserveschutz, vorgesehen ist. Das Schutzkonzept berücksichtigt auch den Fall, dass bei einer grösseren Störung am Regeltransformator der Haupttransformator ohne die Quer-Regeleinheit betrieben werden kann. Die eingesetzten Schutzsysteme werden in der Tabelle III näher beschrieben.

Als Objektschutz wirken am Netzkuppeltransformator die installierten Buchholzrelais und Überdrucksensoren. Das thermische Abbild des Haupt- und Reguliertransformators sowie diverse Überstrom- und Übertemperaturkontrollsysteme ergänzen das umfassende Schutzkonzept.

Zur Vermeidung von hohen Einschalt-Stossströmen (Inrush-Currents) sind die 380-kV-Leistungsschalter des Transformatorfeldes mit einer speziellen Steuerung für das gezielte Zuschalten des Transformators im optimalen Schaltzeitpunkt ausgerüstet [7]. Die elektrodynamischen Kräfte solcher Inrush-Ströme stellen für die Wicklungen von Leistungstransformatoren eine erhebliche mechanische Belastung dar. Mit dieser Massnahme an der Schaltersteuerung wird die unerwünschte Beanspruchung auf ein Minimum reduziert.

Die Systeme zur Überwachung (Online Monitoring) der wichtigsten Betriebsparameter sind auf die Erfassung der aktuellen thermischen Belastung mit gleichzeitiger Ermittlung der Überlastreserven sowie auf die Früherkennung von allfälligen Schwachstellen in der Hauptisolation der Transformatoren und in ihren Schlüsselkomponenten (Durchführungen und Stufenschalter) ausgerichtet. Die installierten Monitoringsysteme und Kontrolleinrichtungen sind in Tabelle IV aufgelistet.

Erste Betriebserfahrungen

Der Netzkuppeltransformator hat sich seit der Inbetriebnahme am 13. Juli 2005 im ordentlichen Netzbetrieb bewährt, zeitweise mit Belastungen bis zur Nennleistung. Die Wirkleistungsflüsse zeigen, dass die neue 380/132-kV-Transformatorengruppe im Normalfall hauptsächlich den nordwestlichen Teil des 132-kV-Netzes versorgt. Mit den 19 Stufen der Spannungsregulierung (Längsregelung) konnte bisher bei allen Lastsituationen das Sollspannungsband zwischen 136 kV und 145 kV eingehalten werden. Die Steuerung der Wirkleistung (Querregelbereich, 25 Stufen) erfolgt wie berechnet in Leistungsschritten von maximal 20 MW und unterstützt den Betrieb des 132-kV-Netzes, indem ungewollte Transite im regionalen Verteilnetz vermieden werden.

Die direkte Transformierung ab dem 380-kV-Netz entlastet die bestehende 380/220-kV-Transformierung und erhöht damit die Übertragungskapazität an der Schweizer Grenze.

Das Betriebsverhalten der Transformatorengruppe bei einer typischen Belastungssituation zeigt Bild 8. Der au-

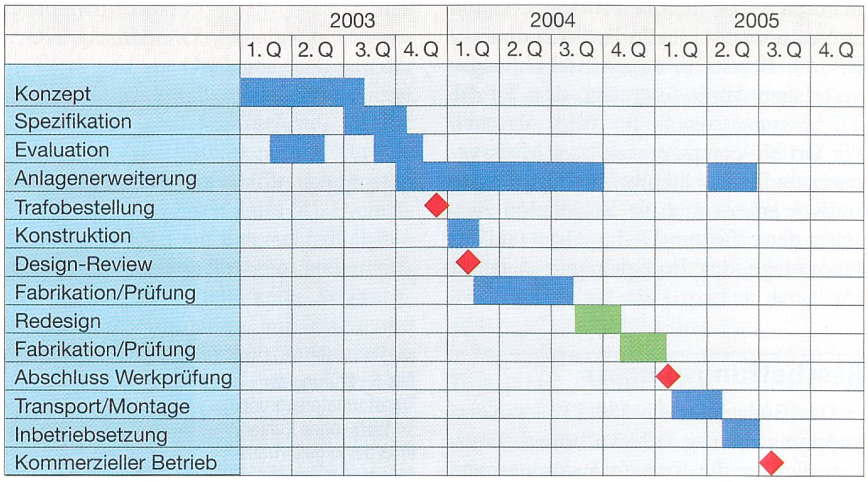


Bild 7 Ablauf des Beschaffungsprozesses (rot: wichtige Meilensteine)

Funktion und Zweck	System
Das Gas-in-Öl-Monitoringsystem Hydran dient zur Messung und Aufzeichnung von gelösten Fehlergasen (hauptsächlich Wasserstoff und Kohlenmonoxid) im Isolieröl des Haupt- und Reguliertransformators. Ausserdem besitzt das Hydran-System einen Sensor für Feuchtigkeit im Öl.	Hydran
Zur Überwachung des thermischen Betriebszustandes des kompletten Netzkuppeltransformators dient das ELIN Trafo-Monitoring. Ausgehend vom aktuellen Belastungszustand wird die zulässige Überlastfähigkeit errechnet. Dabei wird unter der Annahme einer konstanten Belastung der zulässige Weiterbetrieb ohne zusätzlichen Lebensdauerverbrauch bestimmt.	ELIN-Trafomonitoring
Das TapGuard-Monitoringsystem wird zur Überwachung der Stufenschalter im Haupt- und Regeltransformator eingesetzt. Das System kann online das Drehmoment des Antriebes sowie die Öltemperaturen aufzuzeichnen und direkt bewerten. Aus diesen Daten und dem gemessenen Laststrom wird der Abbrand der einzelnen Kontakte berechnet. Nebst der aktuellen Zustandskontrolle zeigt es wertvolle Hinweise für eine effiziente Instandhaltung.	MR-TapGuard
Bei den Hochspannungsdurchführungen werden die kapazitiven Ströme (Vektoren der Stromsumme) online überwacht.	Doble IDD

Tabelle IV Installierte Systeme zur Online-Überwachung der 400-MVA-Transformatorgruppe

tomatisch geregelte Blindleistungsfluss (Regelung der 132-kV-Sammelschiene) hat kaum Einfluss auf die Wirklastflüsse. Eine Verstellung der Querregelung erzeugt jedoch wie erwartet eine Wirklaständerung von rund 20 MW pro Schalterstufe. Damit können Lastflüsse wirksam gesteuert werden. Wichtig wird dies bei Störungen im 220-kV-Netz, weil damit die Verlagerung der Lastflüsse vom 220-kV-Netz auf das schwächere 132-kV-Versorgungsnetz gezielt «gedrosselt» werden kann.

Erkenntnisse aus dem Projekt

Für den Projektleiter war dieses komplexe Projekt sowohl in technischer als auch in organisatorischer Hinsicht eine Herausforderung. Der Erfolg war wesentlich der Tatsache zu verdanken, dass das nötige Know-how (Netz und Transformatorbereich) durch die im Projektteam vertretenen Fachleute weitgehend selbst abgedeckt werden konnte. Beratung und Unterstützung durch ausgewiesene Experten von aussen war dennoch sinnvoll, vor allem bei den ausgedehnten Netzstudien zur Festlegung des Regelbereichs, bei der Formulierung der technischen Spezifikationen und bei der Überprüfung der Transformatorauslegung einschliesslich der Abnahmeprüfungen.

Das Projekt profitierte nicht zuletzt von der fundierten Fachkompetenz des kundenfreundlichen Lieferanten. Es ist gelungen, mit dem Know-how des Trafoherstellers und dem Betreiberwissen des Kunden eine optimale technische Lösung zu finden.

Die erfolgreiche und effiziente Abwicklung einer Transformatorbeschaffung in einem öffentlichen Submissionsverfahren benötigt solide technische und kommerzielle Grundlagen. Bei der Projektplanung wird der Zeitbedarf für die Erarbeitung der technischen Spezifikationen solch komplexer Objekte oft unter-

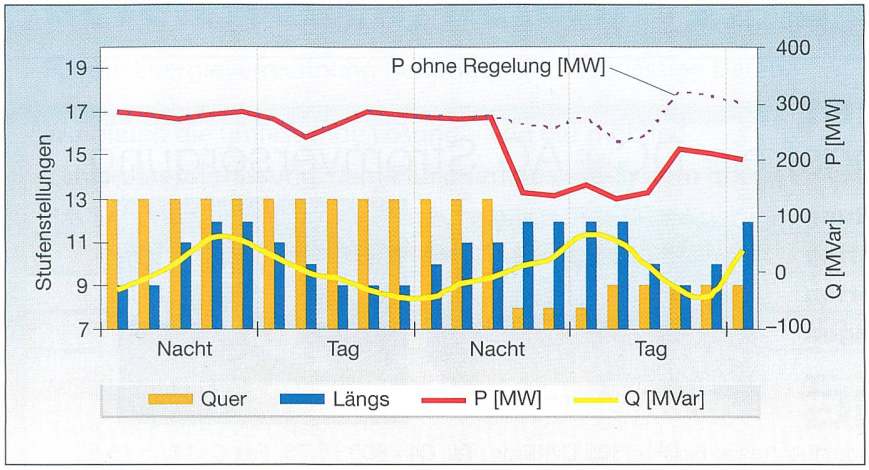
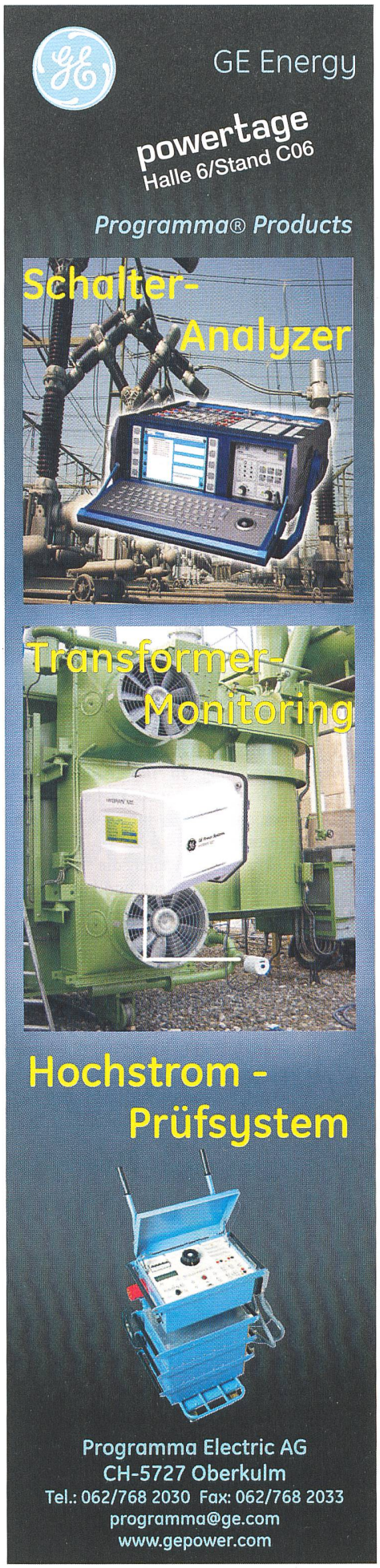


Bild 8 Transformatorengruppe belastet am Netz: Einfluss der Längs- und Querregelung (Stufenschalterstellung) auf die Wirkleistung P (rot) und Blindleistung Q (blau)



schätzt. Im vorliegenden Projekt war dies auch der Fall, stellte doch die definitive Festlegung des Prinzips der Regelung (Quer- oder Schräg-Regelung) und des Regelbereichs unter Berücksichtigung der heutigen und zukünftigen Netzszenarien eine anspruchsvolle Hürde dar und nahm neun Monate in Anspruch. Wichtig war auch, bereits in der Ausschreibungsphase neben den Hauptspezifikationen alle notwendigen Massnahmen zur Sicherung der Qualität sowie Art und Umfang der abzuliefernden Dokumentation und der Zeichnungen festzulegen. Bei der anschliessenden Bestellung wurden mit dem Lieferanten im Rahmen der technischen Spezifikation auch die Durchführung der Abnahmeprüfungen und die nachzuweisenden Garantiewerte verbindlich geregelt.

Die gemeinsame kritische Überprüfung der Transformatorauslegung mit dem Lieferanten im Rahmen eines Design-Review-Prozesses war wertvoll und hat zu signifikanten Konstruktionsverbesserungen geführt. Der Nutzen der intensiven Begleitung des Konstruktions- und Herstellungsprozesses einschliesslich der Werksprüfungen hat sich während des gesamten Projektablaufes mehrfach bestätigt. Dank der sich daraus ergebenden fundierten Kenntnisse des Konstruktionsaufbaues war es möglich, nach dem Durchschlag in der Abnahmeprüfung die vorgeschlagenen Verbesserungen im Wicklungsaufbau innert kurzer Zeit zu beurteilen.

Erfreulich ist auch die Tatsache, dass an einem so grossen und komplexen Objekt die Teilentladungsmessung mit der angestrebten Empfindlichkeit (Grundstörpegel < 12 pC) erfolgreich durchgeführt werden konnte. Dabei wurde sowohl bei den Abnahmemessungen im Werk als auch bei der Montageprüfung vor Ort das spezifizierte TE-Kriterium für die gemessene scheinbare Ladung von 25 pC beim Haupt- und Reguliertransformator erfüllt.

Die bisherigen Betriebserfahrungen mit dem 380/132-kV-Transformator sind durchwegs positiv, lassen aber wegen der noch zu kurzen Einsatzdauer keine abschliessende Beurteilung zu. Die Verstärkung der Transformierungsleistung in Bassecourt um 400 MVA mit der Möglichkeit, die ins 132-kV-Netz eingespeiste Wirkleistung aktiv zu steuern, hat die bereits hohe Versorgungsqualität in der Region der Nordwestschweiz und im Jura noch weiter gesteigert. In der längerfristigen Perspektive besteht in den überregionalen Netzen noch Ausbaupotenzial: Mit einer vollumfänglich automatisierten Regelung (längs und quer) und unter Einsatz spezifischer Netzregler könnte der Betrieb dieser Netze weiter optimiert werden, indem die Transformationsverluste insgesamt minimiert und die Lastflüsse noch schneller den aktuellen Lastsituationen angepasst werden.

Referenzen

[1] Unterstation Bassecourt mit 380 kV, Bulletin SEV/VSE, Vol. 66 (1975), S.1019–1020.

[2] Th. Aschwanden, A. Schenk, J. Kreuzer, J. Fuhr, M. Hässig: On-site Repair, Refurbishment and High Voltage Tests of Large Power Transformers in the Transmission Grid, CIGRE 2004 Session, Paris, Paper A2-203.

[3] J. Dobša: Transformatoren für Längs-, Schräg- und Querregelung, BBC-Mitteilungen, Vol. 8 (1972), S. 376–383.

[4] A. Carlson, J. Fuhr, G. Schemel, F. Wegscheider: Testing of Power Transformers, Pro Print Verlag, Düsseldorf, 2003.

[5] Th. Aschwanden, M. Hässig, J. Fuhr, P. Lorin, V. Der Houhanessian, W. Zaengel, A. Schenk, P. Zweiacker, A. Piras, J. Dutoit: Development and Application of new Condition Assessment Methods for Power Transformers, CIGRE 1998 Session, Paris, Paper 12–207.

[6] M. Maximini, A. Osterholt, J. Peter, Ch. Krämer, B. Klein: Lastflussberechnung statt Netzbau, Regeltransformator ermöglicht Trennung von Erzeugung und Netz, ew, Vol. 104 (2005), Heft 10, S. 48–55.

[7] J. H. Brunke, K.J. Fröhlich: Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. IEEE Transactions and Power Delivery, Vol.16 (2001), S. 276–285.

Angaben zu den Autoren

Dr. ***Thomas Aschwanden***, dipl. El.-Ing. ETH, ist seit 2005 Mitglied der Geschäftsleitung der Kraftwerke Oberhasli AG. Vorher war er als Leiter der Geschäftseinheit Operation Netze bei BKW FMB Energie AG für die Abteilungen Engineering, Instandhaltung und Betrieb Netze verantwortlich.
Kraftwerke Oberhasli AG, 3862 Innertkirchen, ast@kwo.ch

Franz Jaeggi hat 1977 an der Höheren Technischen Lehranstalt beider Basel FHBB als Elektroingenieur FH diplomiert. Nach diversen Projektarbeiten hat er 2002 das Nachdiplom als Betriebswirtschafter NDS/FH, Executice Master of Business Administration, an der FH Basel abgeschlossen. Seit 2003 ist er bei der BKW FMB Energie AG und heute als Projektmanager Wasserkraftwerke tätig.
BKW FMB Energie AG, 3000 Bern, franz.jaeggi@bkw-fmb.ch

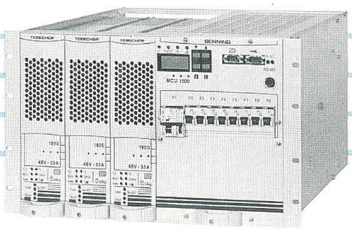
Résumé

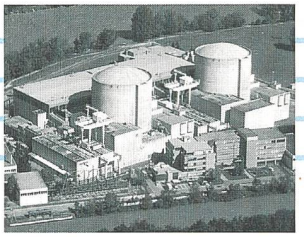
Un transformateur accroît la sécurité d'approvisionnement

Transformateur de couplage de réseau avec réglage en phase et quadrature. L'extension du couplage de réseau 380/132 kV à la sous-station de Bassecourt par un transformateur 400 MVA améliore la qualité d'approvisionnement dans les cantons de Bâle et du Jura ainsi qu'en Suisse romande. Le couplage direct entre le réseau interconnecté 380 kV et le niveau du réseau interrégional 132 kV décharge la transformation 380/220 kV de Bassecourt, accroissant la capacité de transmission à la frontière suisse. En outre, il réduit les pertes de transformation – c'est une solution d'avenir économique. Le nouveau transformateur de couplage réseau apporte au réseau interrégional, grâce au réglage en phase et en quadrature, deux importants avantages: stabilité de tension et réglage ciblé du flux de charge.

Ihr Partner
für unterbrechungsfreie DC + AC Stromversorgung

Beratung
Projekt-Engineering
Gesamtanlagen inkl. Batterien
Wartungsdienstleistungen





BENNING
Benning Power Electronics GmbH, Industriestrasse 6, CH-8305 Dietlikon, Tel. 044 805 75 75, Fax 044 805 75 80
info@benning.ch, www.benning.ch
Sicherheit durch Erfahrung

OPTIMATIK

Energiedaten erfassen, aufbereiten, bereitstellen, liefern…

Für die Energieverrechnung benötigen Sie zuverlässige Daten.

Wir bieten die umfassende Lösung – von der mobilen Zählerdaten-Erfassung, dem Zählerfernauslese-System über das Energiedaten-Management bis zur Internet-Visualisierung.

MOBILE ZÄHLERDATEN-ERFASSUNG
ZÄHLERFERNAUSLESUNG
ENERGIEDATEN-MANAGEMENT

Optimatik AG
Gewerbezentrum Strahlholz
CH-9056 Gais
T +41 71 791 91 00
F +41 71 791 91 10
info@optimatik.ch

www.optimatik.ch

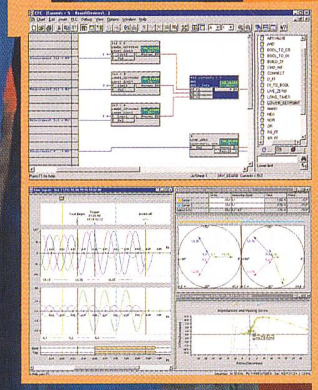
Global network of innovation

SIEMENS

Power Transmission and Distribution

Passt perfekt – über Generationen hinweg

DIGSI 4 – die durchgängige Software für alle SIPROTEC-Geräte



Mit DIGSI 4 können Sie alle Mitglieder unserer SIPROTEC 4 Schutz- und Feldleitgeräte bedienen. Denn dieses PC-Programm passt durchgängig zur SIPROTEC-Systemfamilie. Vom kleinsten bis zum grössten Gerät. Über Generationen hinweg. Ob Einstellung und Inbetriebnahme der Geräte oder einfache Auswahl und Dokumentation bei Anlagenstörungen – DIGSI 4 ist ein durchgängiges Bedientool für alle Aufgaben. Damit wird das Arbeiten nicht nur schneller, sondern es macht auch mehr Spass.

Weitere Informationen:
Siemens Schweiz AG, Power Systems, Freilagerstrasse 40, 8047 Zürich, Tel. 0585 583 580, Fax. 0585 583 192, power.info@siemens.ch, www. siemens.ch/powersystems
www.digsi.de

So einfach kann Fortschritt sein.

E50001-U321-Z183