

Wechselspannungsanlagen für Werks- und vor Ort Prüfungen von SF6 - Anlagen

Dr.-Ing. Joachim Schramm, Haefely Trench AG, Basel
Dr.-Ing. Udo Stietzel, Haefely Trench MWB GmbH, Bamberg
Dipl.-Ing. Michael Gamlin, Haefely Trench AG, Basel

1 Einleitung

Seit der Einführung SF6 - isolierter Schaltanlagen (GIS - Anlagen) vor ca. 30 Jahren, werden verschiedene Prüfmethode und Prüfspannungen diskutiert. Da nur transportable Einheiten in der Fabrik geprüft werden können, war schon bald klar, daß die komplette Schaltanlage vor der Inbetriebnahme noch einmal mit Hochspannung geprüft werden muß.

Die dielektrische Prüfung vor Ort soll zeigen, daß es während des Transports zu keinem Schaden gekommen ist und die Einheiten richtig zusammengebaut wurden. Das Isolations-system in GIS - Anlagen ist eine reine Gasisolation bzw. die Kombination aus einer Gas- und Feststoffisolation. Entsprechend ihres physikalischen Verhaltens können die bei vor Ort Prüfungen festgestellten Fehler in zwei Kategorien eingeteilt werden.

Kategorie A: Bewegliche Teilchen:

- leitfähig
- isolierend

Kategorie B: Örtliche Feldstörungen:

- Montagefehler
- Fehler an Hochspannungselektroden und / oder -verbindungen
- Werkzeuge, die liegen gelassen wurden
- Bereiche, die in der Fabrik nicht mit der richtigen Feldverteilung geprüft werden konnten
- Feste Teilchen

Insbesondere bei den ersten installierten GIS - Anlagen erfolgte keine Hochspannungs-prüfung vor Ort. Mit zunehmender spezifischer Beanspruchung der GIS - Anlagen wurden alle Spannungsarten erprobt, inklusive der Gleichspannung, weshalb heute umfassende praktische Ergebnisse zur Verfügung stehen. Trotzdem kann beobachtet werden, daß es von Land zu Land, von Hersteller zu Hersteller und auch von Betreiber zu Betreiber unterschiedliche Philosophien gibt, je nach dem welche Erfahrungen gemacht wurden. Darüber hinaus ist auch noch zu berücksichtigen, welches Prüfsystem mit vertretbarem Aufwand vor Ort geschafft werden kann. Zur Zeit lassen sich drei grundsätzliche Philosophien unterscheiden:

1. Eine vor Ort Prüfung nach der Montage ist nicht notwendig, da die komplette GIS - Anlage in der Fabrik geprüft wird. Problem: Nach der Prüfung muß die Anlage wieder demontiert, transportiert und montiert werden.
2. Prüfung der Anlage vor Ort mit Wechselspannung und zwar mit 80 % bis 100 % des Prüfspannungswertes bei der Stückprüfung. Dieses Verfahren wird hauptsächlich bei GIS - Anlagen mit Nennspannungen kleiner als 245 kV eingesetzt. Die Aussagekraft dieses Prüfverfahrens läßt sich noch durch die Kombination mit einer Teilentladungsmessung steigern.

3. Konditionierung der GIS - Anlage mit einer vergleichsweise niedrigen Wechselspannung, an die sich die eigentliche Hochspannungsprüfung mit Blitz- und / oder Schaltstoßspannungen anschließt. Die Amplitude der Stoßspannungen liegt auch im Bereich von 80 % bis 100 % des Prüfspannungswertes bei der Stückprüfung.

Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, daß diese Werte zu hoch sein könnten. Bei Überschlügen während der Prüfung entstehende Wanderwellen können zu Sekundärüberschlügen führen, die jedoch nicht registrierbar sind.

2 Normen

Die IEC Publikation 517, zweite Ausgabe von 1986, befaßt sich ab Seite 57 mit der vor Ort Prüfung von GIS - Anlagen. Es werden unter anderem folgende Hinweise gegeben:

Aufgrund der unterschiedlichen Ziele soll die Stückprüfung in der Fabrik nicht durch die vor Ort Prüfung ersetzt werden. Sie ist eine zusätzliche Prüfung mit dem Ziel, die einwandfreie Montage der Anlage nachzuweisen. Die vor Ort Prüfung sollte nach abgeschlossener Montage der Anlage als eine der letzten Prüfungen durchgeführt werden und zwar bei Nenndruck.

Die IEC läßt es zu, daß Komponenten vor der Prüfung demontiert werden, sei es aufgrund zu hoher Ladeströme oder ihrer spannungsbegrenzenden Wirkung, wie z. B.:

- Hochspannungskabel und / oder Freileitungen
- Leistungstransformatoren und / oder Spannungswandler
- Überspannungsableiter und / oder Funkenstrecken

Es muß jedoch darauf geachtet werden, daß die erneute Montage dieser Komponenten nicht zu neuen Fehlern führt. Die Prüfspannung kann an jeder beliebigen Stelle der GIS - Anlage eingespeist werden. Es ist auch zulässig die GIS - Anlage durch das Schalten von Trennern und Leistungsschaltern in kleinere Prüfabschnitte zu unterteilen und zwar zur:

- Begrenzung der Belastung des Prüftransformators
- Begrenzung der Entladungsenergie im Falle eines Überschlages
- Lokalisierung des Überschlagesortes

Bezüglich der Kurvenform der Prüfspannung wird auf die IEC Publikation 60 - 1, zweite Ausgabe von 1989, verwiesen. Es wird jedoch ausdrücklich angemerkt, daß auch ähnliche Kurvenformen verwendet werden dürfen und eine ideale Wellenform nicht existiert.

Die Wechselspannung wird als sehr sensitiv im Bezug auf die Detektion von Verunreinigungen (wie z. B. leitfähigen Teilchen) charakterisiert und weiterhin angemerkt, daß sie auch zufriedenstellende Ergebnisse bei Feldstörungen zeigt. Die bestehenden Erfahrungen basieren auf Prüfungen bei 50 Hz und 60 Hz. Die Höhe der Prüfspannung sollte auf 80 % der Spannung bei der Stückprüfung begrenzt werden und die Dauer eine Minute nicht überschreiten.

Im Gegensatz dazu lassen sich mit Blitzstoßspannungen besonders gut Feldstörungen im Leiterbereich nachweisen, die bei der Wechselspannungsprüfung durch die Koronastabilisierung verdeckt werden.

Daraus folgt für die Wechselspannungsprüfung, daß sie wenn immer möglich mit einer TE - Messung kombiniert werden sollte.

Gleichspannungsprüfungen werden von der IEC für Wechselspannungsanlagen nicht empfohlen.

Wie die bisherigen Ausführungen gezeigt haben, sprechen viele Gründe für die Prüfung einer GIS - Anlage mit Wechselspannung, sowohl bei den Stückprüfungen im Werk als auch bei den Inbetriebnahmeprüfungen vor Ort. Folgende Prüfsysteme können eingesetzt werden:

- SF6 - isolierte AC - Prüfsysteme, Typ TES
- Serieresonanz AC - Prüfsysteme, Typ RSZ
- Konventionelle AC - Prüfsysteme, Typ PZT

Die Typen TES und RSZ eignen sich besonders für den Einsatz bei vor Ort Prüfungen, während für Stückprüfungen im Werk eher die Typen TES und PZT in Frage kommen. Im konkreten Einzelfall müssen jedoch die Vorteile und Nachteile der einzelnen Systeme vom Anwender genau analysiert werden.

3 SF6 - isolierte AC - Prüftransformatoren, Typ TES

Die SF6 - isolierten AC - Prüftransformatoren TES (Transformator Einphasig SF6 - isoliert) wurden speziell für die Prüfung von GIS - Anlagen konstruiert, sie können direkt angeflanscht werden. Alle Hochspannung führenden Teile befinden sich vollständig innerhalb der Kapselung des Transformators, bzw. der GIS - Anlage. Damit können die Prüfungen ohne die bei konventionellen Anlagen notwendigen Schutzbereiche (Sicherheitsabstände) durchgeführt werden. Dies ist insbesondere dann von Interesse, wenn die Prüfungen unter beengten Platzverhältnissen ausgeführt werden müssen. Dies kann bei Stückprüfungen der Fall sein, wenn das Prüffeld sehr klein ist, oder bei vor Ort Prüfungen, wenn die GIS - Anlage beispielsweise als Übergabestation im Keller eines Hochhauses installiert ist. Ein weiterer Vorteil der TES ist, daß sie sowohl vertikal als auch horizontal montiert werden können.

3.1 Aufbau der TES

Die Konstruktion der TES entspricht SF6 - Spannungswandlern, jedoch sind die Aktivteile ihrer neuen Funktion angepaßt worden. Den prinzipiellen Aufbau zeigt Bild 1.

In einem Stahl- oder Aluminiumdruckgefäß (1) mit einem gasdichten Epoxidharzstützer (2), ist der Eisenkern (3) des Transformators installiert. Die Niederspannungswicklung (4) ist auf einem Schenkel des Eisenkerns montiert und darauf konzentrisch die Hochspannungswicklung (5) angeordnet. In die Hochspannungswicklung sind Steuerelektroden (6) zur Steuerung der äußeren Feldstärke im Gasraum integriert. Die Hochspannungselektrode (7) ist unmittelbar mit dem Hochspannungsanschluß (8) verbunden. Die Hochspannungselektrode (7) und die Meßelektrode (9) bilden zusammen den Oberkondensator eines kapazitiven Spannungsteilers, der für die direkte Hochspannungsmessung verwendet werden kann, es ist deshalb kein zusätzlicher Meßkondensator erforderlich.

Technische Daten TES

Typ	Tankgröße	U_{2N} max. kV	$P_{15'}$ max. kVA	$P_{2'}$ max. kVA	$I_{2.15'}$ A	C_L pF	C_e pF	L_S H	U_k %	C_M pF
TES 230/45	1	230	45	100	0.1956	2600	100	936	25	9
TES 325/30	2	325	30	70	0.0923	800	100	1905	17	9
TES 510/90	3	510	90	200	0.1765	970	130	2484	27	14
TES 750/250	4	750	250	600	0.3333	1260	150	1218	17	14
TES 1000/375	5	1000	375	1000	0.375	994	200	1529	18	20

Die angegebenen Werte gelten für einen 15-minütigen Kurzzeitbetrieb bei 50 Hz.

Die Niederspannungswicklung aller TES ist in zwei Gruppen unterteilt, die parallel oder in Reihe geschaltet werden können. Bei Parallelschaltung und voller Erregung ergibt sich die maximale Prüfspannung, bei Serienschaltung mit gleicher Erregung die halbe. Diese Schaltung ist bei niedrigen Prüfspannungen zweckmäßig, um die Höhe genau einstellen zu können.

3.2 Lastbereich der TES

Durch den kompakten Aufbau der TES und die Verwendung eines Gases als Isolation ist die Leistungsfähigkeit der TES begrenzt. Diese Transformatoren wurden aber speziell für die Prüfung von GIS - Anlagen entwickelt, bei der die Prüfzeiten sehr kurz sind (1 Minute) und die Anlage durch Schalthandlungen in kleine Abschnitte unterteilt werden kann. Für Dauerversuche können die TES nur mit stark reduzierten Leistungen eingesetzt werden.

Den Lastbereich eines TES 510/90 zeigt Bild 2. Die sekundärseitigen Größen wurden auf die Primärseite umgerechnet. Als Parameter werden in dem Diagramm verschiedene Prüfspannungen und Lastkapazitäten dargestellt. Folgende Größen bestimmen den Lastbereich:

1. Innerer Spannungsabfall

Der innere Spannungsabfall, hervorgerufen durch den kapazitiven Stromfluß durch die Streuinduktivität des Transformators, führt dazu, daß bei zunehmender kapazitiver Last die Prüfspannung bereits bei immer niedrigeren Primärspannungen erreicht wird. Dies hat Konsequenzen im Bezug auf die Kompensation, wie später noch gezeigt werden wird.

2. Max. zulässiger Strom

Der 15 - bzw. 2 - Minuten Strom bestimmt die Erwärmung der TES, wobei ein hoher Strom zu einer Erwärmung der Niederspannungswicklung führt, während mehrere Prüfungen mit kleinen Strömen eine Erwärmung der Hochspannungswicklung zur Folge haben. Ein Thermoelement zwischen der Nieder- und Hochspannungswicklung dient zur Temperaturüberwachung.

3. Resonanz

Bei einem großen inneren Spannungsabfall, d. h. bei einer großen Prüfkapazität, ist die Stabilität der Spannungseinstellung gefährdet. Aufgrund der Resonanznähe führt eine kleine Änderung der Primärspannung zu einer großen Spannungsänderung auf der Sekundärseite. Auch die Gleichmäßigkeit der Spannungsverteilung innerhalb der Wicklung kann gestört werden. Aus diesem Grund ist eine Begrenzung des inneren Spannungsabfalls auf max. 70 % erforderlich.

4. Eigenkapazität

Die Eigenkapazität der TES muß bei der Berechnung der maximalen Lastkapazität abgezogen werden.

Damit können folgende Feststellungen für den optimalen Einsatz der TES gemacht werden:

1. Mehrere Prüfungen mit kleineren Lasten sind günstiger, damit der Transformator zwischendurch abkühlen kann.
2. Ist die Prüfspannung niedriger als die Nennspannung, kann eine höhere Lastkapazität geprüft werden.
3. Wird die Lastkapazität und der Prüfzyklus bei mehreren aufeinander folgenden Prüfungen nicht verändert, kann der maximal zulässige Strom bestimmt werden. Umgekehrt ist es auch möglich, bei gegebenem Strom (Lastkapazität) den Prüfzyklus zu berechnen.

Ein solcher Fall tritt bei der vor Ort Prüfung einer GIS - Anlage ein, wenn über die Sammelschiene geprüft und immer nur ein Feld zugeschaltet wird.

3.3 Möglichkeiten der Leistungserhöhung

Die prüfbare Lastkapazität kann weiter gesteigert werden, indem die TES mit einer reduzierten Sekundärspannung gebaut werden. Dies soll am Typ TES 510/90 verdeutlicht werden:

Für eine 245 kV GIS - Anlage schreibt IEC eine Prüfspannung von 368 kV vor. Es wäre für diese Prüfung also vollkommen ausreichend einen TES 510/90 für eine Sekundärspannung von 400 kV zu dimensionieren. Das führt zu den in Bild 3 dargestellten Veränderungen:

1. Da das Aktivteil bei vorgegebenem Kessel nicht vergrößert werden kann, bleibt die Leistung des TES konstant. Aufgrund der reduzierten Sekundärspannung steigt der 2 - Minuten Strom jedoch von 392 mA auf 500 mA, d. h. um ca. 30 %.
2. Die Streuinduktivität des TES wird kleiner, wodurch sich der induktive Spannungsabfall verringert. Dies führt zu einer zusätzlichen Vergrößerung des Lastbereiches, da der unzulässige Resonanzbereich erst bei höheren Lastkapazitäten erreicht wird.

Die richtige Wahl der Sekundärspannung des TES führt in diesem Beispiel bei einer Prüfspannung von 400 kV zu einer Erhöhung der prüfbaren Lastkapazität von 2725 pF auf 3850 pF. Dies entspricht einer Erhöhung um immerhin 40 %. An weiteren Möglichkeiten zur Steigerungen der Leistungsfähigkeit dieses TES wird gearbeitet. Modifikationen am Eisenkern, am Wicklungsaufbau, an der Wicklungsform und des inneren Aufbaus lassen Leistungssteigerungen bis zu 50 % realistisch erscheinen.

4 SF6 - isolierte AC - Prüfsysteme, Typ TES

Ein Prüfsystem besteht jedoch nicht nur allein aus dem Prüftransformator, sondern es umfaßt die folgenden weiteren Komponenten:

- SF6 - isolierter AC - Prüftransformator, Typ TES
- Stelltransformator
- Kompensationsdrossel
- Kontroll- und Meßsystem
- Adapter, zum Anflanschen des TES an die zu prüfende GIS - Anlagen

Da die TES bis zur Nennspannung nahezu teilentladungsfrei sind und zusammen mit der GIS - Anlage eine geschirmte Prüfzelle bilden, können vor Ort Teilentladungsmessungen mit diesem Prüfsystem durchgeführt werden. Dazu muß es um folgende Komponenten erweitert werden:

- SF6 - isolierter Koppelkondensator
- Netzfilter im Stelltransformator
- 3- oder 4-flansch Gehäuse zur Verbindung der einzelnen Komponenten und zum Anflanschen an die GIS - Anlage
- TE - Detektor

4.1 Stelltransformator / Kompensationsdrossel

Der Stelltransformator kann so dimensioniert werden, daß er in seiner Leistungscharakteristik genau dem TES angepaßt ist. Bei den kleineren Typen ist dies ohne Probleme möglich, bei den leistungstärkeren würde dies jedoch zu teuren und schweren Lösungen führen. Der TES 750/250 z. B. hat eine Kurzzeitleistung von 600 kVA, für die der Stelltransformator ausgelegt werden muß. Als zusätzlicher Nachteil käme noch hinzu, daß das Prüfsystem bei einer Speisespannung von 500 V einen Strom von 1200 A zieht, der in der Regel weder in Prüffeldern noch bei vor Ort Prüfungen zur Verfügung steht.

Da es sich bei den GIS - Anlagen um kapazitive Lasten handelt, kann der Strom mit einer Drossel kompensiert werden, die auf der Niederspannungsseite parallel zum Prüftransformator geschaltet wird. Die Kompensationsdrossel muß in Stufen verstellbar sein, um eine Anpassung an die jeweilige Lastkapazität zu ermöglichen. Die Verstellung kann sowohl manuell über einen Kreuzschienenverteiler oder Handschalter erfolgen, als auch vollkommen automatisch mittels Schützen, die vom Kontrollsystem angesteuert werden. Für vor Ort Prüfungen eignet sich eher die manuelle Umschaltung, damit das System so einfach wie möglich wird. In Prüffeldern, mit dauernd wechselnden Prüflasten, wird sich die automatische Lösung eher auszahlen.

Bei der Dimensionierung der Kompensationsdrossel ist jedoch der innere Spannungsabfall der TES zu beachten, der zur Folge hat, daß bei steigenden Prüfkapazitäten die Prüfspannung bereits bei immer niedrigeren Primärspannungen erreicht wird. Dieses Verhalten verdeutlicht Bild 4, das wiederum das Lastdiagramm für einen TES 510/90 zeigt.

Das Prüfsystem wird zur Prüfung einer Lastkapazität von 2320 pF bei 510 kV eingesetzt. Die Primärspannung zur Erregung des TES 510 beträgt aufgrund des inneren Spannungsabfalls nur noch 160 V und dies ist auch die Spannung, die an der Kompensationsdrossel anliegt. Damit beträgt die erforderliche Kompensationsleistung 500 kVA bei 400 V. Von

diesem Wert kann jedoch die Kurzzeitleistung des Stelltransformators subtrahiert werden. Wird dieses Verhalten der TES bei der Dimensionierung der Kompensationsdrosseln nicht entsprechend berücksichtigt, werden die Drosseln zu klein ausgelegt.

Wird das Prüfsystem im hohen Lastbereich betrieben, kann die Aufteilung der Niederspannungswicklung in zwei Gruppen vorteilhaft genutzt werden, indem von der Parallel- auf die Serienschaltung gewechselt wird. Jetzt ist die doppelte Primärspannung erforderlich, in diesem Fall 320 V, um die gewünschte Prüfspannung zu erreichen. Damit verdoppelt sich auch die Spannung an der Kompensationsdrossel und ihre Wirkung wird gesteigert.

Normalerweise sollte die Drossel so dimensioniert werden, daß der gesamte Lastbereich des Transformators ausgenutzt werden kann. Nur in Spezialanwendungen, wenn die Prüfspannung und die Lastkapazität immer in einem engen definierten Bereich liegen, kann die Kompensationsdrossel maßgeschneidert werden. Das System ist dann jedoch nicht mehr universell einsetzbar.

In der Zukunft könnten kontinuierlich arbeitende Kompensationssysteme zum Einsatz kommen, die entweder auf der Niederspannungsseite oder gleich auf der Hochspannungsseite installiert werden.

4.2 Steuerung

Als Steuerung der Prüfsysteme können sowohl einfache Handsteuerungen mit manueller Verstellung der Primärspannung als auch vollautomatische Kontrollsysteme mit Computerunterstützung zum Einsatz kommen.

Vor Ort kommt es darauf an, daß die Funktion des Prüfsystems unter allen Umständen gewährleistet ist. Da manchmal die Eigenversorgung der Baustelle recht instabil ist (Notstromaggregate), hat selbst eine Handregelung der Primärspannung ihre Vorteile. Ein automatisches Kontrollsystem ist vor Ort nicht hilfreich, wenn es wegen Frequenzschwankungen oder Spannungseinbrüchen ausfällt.

Im Laborbetrieb hingegen, mit vielen Wiederholprüfungen, ist ein automatisches Kontrollsystem von großem Nutzen. Komplette Prüfsequenzen für verschiedene Prüfobjekte lassen sich speichern und bei Bedarf erneut aufrufen. Das Prüfprogramm wird von der Steuerung automatisch abgefahren und der Prüferingenieur bei der Protokollierung unterstützt.

4.3 Koppelkondensator / Teilentladungs - Messung

Die IEC 517 charakterisiert die Wechselspannungsprüfung als sehr sensitiv im Bezug auf die Detektion von Verunreinigungen (wie z. B. leitfähige Teilchen), Feldstörungen im Leiterbereich werden jedoch durch die Koronastabilisierung verdeckt. Dieser Nachteil läßt sich umgehen, indem die Wechselspannungsprüfung mit einer TE - Messung kombiniert wird.

Da die TES mit den GIS - Anlagen ein geschirmtes System darstellen, muß auch der Koppelkondensator, für die Auskopplung der TE - Impulse von der Hochspannung, gekapselt ausgeführt werden. Dazu wird in ein Stahl- oder Aluminiumdruckgefäß mit einem gasdichten Epoxidharzstützer ein SF6 - isolierter Kondensator eingebaut. Diese Bauweise führt zu einem Eindrucksystem mit einem niedrigen Gewicht, einer Einstoffisolierung (kein Öl) und einem niedrigen TE - Pegel, was besonders wichtig ist.

Der Anschluß des SF6 - isolierten Koppelkondensators an das Prüfsystem kann über ein spezielles Mehrflanschgehäuse oder aber auch über Standard 3-flansch und 4-flansch Gehäuse erfolgen. Entsprechend den IEC - Bestimmungen muß die TE - Messung nicht bei voller Prüfspannung erfolgen. Dies eröffnet die Möglichkeit, den Koppelkondensator nur für diese niedrigere Spannung zu dimensionieren. Vorteile dieser Lösung sind ein reduziertes Gewicht, ein geringerer Platzbedarf und niedrigere Kosten. Über eine Trenner - Erder Kombination muß jedoch sicher gestellt werden, daß der Koppelkondensator bei der eigentlichen Hochspannungsprüfung vom restlichen Prüfsystem getrennt und geerdet ist. Dies kann über ein automatisches Kontrollsystem sichergestellt werden.

Durch die vollständige Schirmung lassen sich zur TE - Messung breitbandige Teilentladungsmeßgeräte einsetzen, z. B. das TE 571-1. Diese Meßgeräte werden laufend weiterentwickelt, um Klassifizierungsmuster nach Amplitude und Position der Störimpulse, bezogen auf die Phasenlage der angelegten Spannung zu erstellen. Diese Muster (Fingerprints) sollen es ermöglichen, auf vorhandene Unregelmäßigkeiten zu schließen.

5 Serieresonanz AC - Prüfsysteme, Typ RSZ

SF6 - isolierte - Prüfsysteme haben viele Vorteile, wie z. B. kleine Abmessungen, geringes Gewicht, leichter Transport, kurze Aufbauzeit, gute TE - Meßbarkeit und hohe Zuverlässigkeit, jedoch ihre Leistungsfähigkeit ist begrenzt. Bei GIS - Anlagen mit Nennspannungen größer als 245 kV oder bei sehr großen Anlagen ist ihr Einsatz deshalb auf einige spezielle Anwendungen limitiert, wie z. B. die Stückprüfung von Komponenten in der Fabrik oder die Prüfung von Abschnitten von GIS - Anlagen nach einer Reparatur oder Inspektion. Für die vor Ort Prüfung von neu errichteten 420 kV Anlagen wird deshalb eine leistungstärkere Prüfeinrichtung benötigt, das Serieresonanz AC - Prüfsystem (RSZ).

Das RSZ arbeitet nach dem Prinzip der Serieresonanz, d. h. die Induktivität der Hochspannungsdrossel wird solange verändert, bis sie mit der zu prüfenden Lastkapazität in Resonanz ist. Die Hochspannungsdrossel dient somit zugleich der Hochspannungserzeugung und der Blindleistungskompensation. Aus diesem Grund ist ein RSZ wesentlich leichter als ein konventionelles AC - Prüfsystem mit Drosseln zur Blindleistungskompensation.

Die Hochspannungsdrosseln sind modular aufgebaut. Standardmäßig werden sie für Spannungen von 300 kV und 400 kV gebaut, für spezielle Anwendungen ist auch jede Zwischen-spannung realisierbar. Die Ströme bei beiden Spannungsreihen sind so abgestuft, daß sich folgende Leistungsreihe ergibt: 600 kVA, 1200 kVA, 2400 kVA, 3600 kVA und 4800 kVA. Die einzelnen Module können in Reihe geschaltet werden, indem Module gleicher Bauart übereinander gestellt werden. Spannungen bis zu 2000 kV sind auf diese Weise erzeugbar. Für einen hohen Strom, wie er z. B. bei Kabelprüfungen benötigt wird, können auch mehrere Module parallel geschaltet werden.

5.1 Aufbau der Hochspannungsdrosseln

Der Kern der Hochspannungsdrosseln ist aus hochwertigen, verlustarmen Blechen aufgebaut. Er besteht aus zwei beweglichen U - förmigen Teilkernen, die durch einen Spalt voneinander getrennt sind. Mit gegenläufigen Kugelumlaufspindeln und Schneckengetrieben wird der Spalt zwischen den Teilkernen verändert und dadurch die Induktivität der Hochspannungsdrosseln auf die Last abgestimmt.

Die Hochspannungswicklungen sind in Lagen aufgebaut. Dies bewirkt eine gute kapazitive Steuerung und damit eine sehr gute Festigkeit gegenüber transienten Überspannungen. In jeder Hochspannungsdrossel sind zwei Hochspannungswicklungen eingebaut und zwar so, daß sie die beiden Spalte umschließen. Hierdurch wird der Streufluß auf ein Minimum reduziert. Die Imprägnierung der Wicklungen erfolgt mit einem hochwertigen Mineralöl.

Das Aktivteil, bestehend aus Kern und zwei Spulen, wird in einen Stahlkessel montiert. Dieser befindet sich auf Mittenpotential, so daß an ihn oben und unten GFK - Zylinder angeflanscht werden müssen, von denen jeder die Isolation für 50 % der Nennspannung gewährleistet.

Die Hochspannungsdrosseln werden auf einem Grundrahmen montiert, an dem auch die Antriebseinheit zum Verstellen der Spalte befestigt ist. Die Antriebswellen gehen durch alle aufeinander gestellten Hochspannungsdrosseln hindurch und gewährleisten so die synchrone Einstellung aller Spalte.

5.2 AC - Prüfsystems mit RSZ

Auch dieses Prüfsystem besteht nicht nur allein aus den Hochspannungsdrosseln, sondern es umfaßt die folgenden weiteren Komponenten:

- Hochspannungsdrosseln
- Erregertransformator
- Stelltransformator
- Koppelkondensator
- Kontroll- und Meßsystem

Teilentladungsmessungen vor Ort sind auch mit diesem Prüfsystem möglich, dazu muß es jedoch um folgende Komponenten erweitert werden:

- Hochspannungsfilter im Koppelkondensator
- Netzfilter im Stelltransformator
- TE - Detektor

Durch die erforderlichen Abstände zwischen den Komponenten des Prüfsystems werden große Schleifen aufgespannt, die Störungen jeglicher Art auffangen können. Die Filter führen zwar zu einer Dämpfung dieser Störungen, können sie aber nicht unterdrücken. Deshalb werden sich mit den RSZ nicht so gute Resultate bei den TE - Messungen erzielen lassen wie mit den TES

Der am Netz angeschlossene Stelltransformator dient zur Einstellung der Spannung, die mit dem Erregertransformator hochtransformiert wird und den Schwingkreis anregt, der aus der Hochspannungsdrossel und der Lastkapazität besteht. Durch die Variation des Spaltes in der Hochspannungsdrossel kann die Induktivität im Bereich von 1 : 20 variiert werden.

Im Prüfbetrieb wird die Reaktanz der Hochspannungsdrossel so eingestellt, daß sie der Impedanz der Lastkapazität entspricht. Es ergibt sich also ein Serieresonanzkreis für die Netzfrequenz. Mit verlustarmen Prüfobjekten, zu denen GIS - Anlagen gehören, wurden bereits Gütefaktoren von bis zu 70 gemessen, durchschnittlich kann aber von einem Gütefaktor von 50 ausgegangen werden. Dies bedeutet für ein RSZ von 1200 kVA (600 kV, 2 A), daß nur noch eine Anschlußleistung von ca. 25 kVA erforderlich ist.

Die Prüfspannung ist rein sinusförmig, da das System mit der Grundschiwingung (50 Hz oder 60 Hz) schwingt, die dritte und fünfte Harmonische werden sehr stark gedämpft. Im Fall eines Überschlages auf der Hochspannungsseite, wird der Hochspannungskreis außer Resonanz gebracht, d. h. nahezu jede Energiezufuhr aus dem Netz in die Überschlagsstelle ist unterbunden und die Ursache des Überschlages kann untersucht werden.

Ein konventioneller Transformator ist im Kurzzeitbereich überlastbar, dieses Verhalten gibt es bei den RSZ nicht. Es können alle Lastkapazitäten geprüft werden, die im Tuningbereich liegen. Ist die Lastkapazität aber nur ein wenig größer, kann der Resonanzpunkt nicht mehr erreicht werden und eine Prüfung ist unmöglich.

Bezüglich der Kontrollsysteme gilt für die RSZ das gleiche wie für die TES. Von einfachen manuellen Steuerungen bis zu automatischen Kontrollsystemen stehen alle Varianten zur Verfügung.

5.3 Container

Das Prüfsystem RSZ besteht aus vielen Komponenten, die bei der Hochspannungsprüfung einer GIS - Anlage vor Ort transportiert und montiert werden müssen.

Um sowohl den Transport des Prüfsystems zu erleichtern, als auch die Aufbauzeit so kurz wie möglich zu halten, können Komponenten des Prüfsystems fest in einem Container installiert werden. Es empfiehlt sich, hierfür Standard Ganzstahl - Container zu verwenden, die zum einen sehr robust sind und zum anderen ohne Probleme per Schiff, Eisenbahn und LKW transportiert werden können. Für tropische Länder ist auch der Einbau einer Klimaanlage in den Container möglich.

Ein Teil des Containers dient als Kontrollraum. In ihm sind der Stelltransformator, der Erregertransformator und die Steuerung fest installiert und untereinander verkabelt. Die Erregerspannung wird mittels eines Kabels zu Hochspannungsdrossel übertragen. Alle Hochspannung führenden Teile im Container sind durch Drahtgitter gegen zufälliges Berühren geschützt und entsprechend in das Sicherheitssystem integriert. Alle Komponenten sind an einem zentralen Punkt geerdet, der von außen zugänglich ist.

Der verbleibende Raum im Container dient zur Aufnahme der Grundgestelle, Koppelkondensatoren, Steuerelektroden und aller anderen Teile während des Transports und der Lagerung des Prüfsystems.

6 Konventionelles AC - Prüfsystem, Typ PZT

Die einphasigen, ölisierten Hochspannungsprüftransformatoren PZT (Prüftransformator in Zylinderbauweise mit Tertiärwicklung) in Isoliermantelbauweise haben sich in vielen Jahrzehnten bewährt und stehen wohl in den meisten Hochspannungsprüffeldern. Für Stückprüfungen an Komponenten von GIS - Anlagen sind sie bestens geeignet, hingegen für den Einsatz bei vor Ort Prüfungen aufgrund ihres hohen Leistungsgewichtes weniger. Leistungsmäßig sind sie zwischen den TES und den RSZ einzuordnen. Durch den Einsatz modernster Technologie und Fertigungstechnik kann auch dieses System immer noch weiter verbessert werden.

Der Transformatorkern ist vertikal angeordnet, hat keinen Rückflußschenkel und ist sowohl mechanisch als auch elektrisch mit der Basiselektrode verbunden. Jeder Schenkel trägt in konzentrischer Anordnung eine Sekundär- Primär- und Tertiärspule. Auf eine Schubwicklung kann verzichtet werden, da der magnetische Fluß in beiden Schenkeln durch die Primärspulen eingeprägt wird.

Dieser Aufbau des Aktivteils garantiert die sehr niedrige Kurzschlußspannung von nur 3,3 %, bezogen auf die Dauerleistung von 600 kVA, bei einem PZT 400 - 4. Nur dadurch ist es möglich, bis zu vier Module zu kaskadieren, was einer maximalen Prüfspannung von 1600 kV entspricht. Die lineare Spannungsaufteilung über die Module bei kapazitiver Last wird durch interne, parallel zu den Tertiärwicklungen geschaltete, Kompensationsdrosseln erreicht. Sie bewirken eine zusätzliche Leistungssteigerung der Kaskade sowie eine Verringerung der Einspeiseleistung.

Die Sekundärspulen werden in einem Wärmeprozess unter Vakuum über einen längeren Zeitraum getrocknet, um die Restfeuchtigkeit auf ein Minimum zu reduzieren. Das Dielektrikum besteht aus hochwertigem Isolierpapier und Preßspan. Für den Isoliermantel wird glasfaserverstärktes Epoxidharz verwendet, das durch einen Feuchtigkeit abweisenden Anstrich geschützt ist. Nach dem Trocknungsprozeß wird das komplette Modul unter Vakuum mit Isolieröl gefüllt.

Die beiden Sekundärspulen sind intern zur Sekundärwicklung verschaltet. Das erdseitige Ende ist isoliert herausgeführt, das hochspannungsseitige Ende mit der Hochspannungselektrode verbunden. Ebenso sind die Anschlüsse der beiden Einspeisespulen und der beiden Tertiärspulen isoliert herausgeführt, so daß sie wahlweise parallel oder seriell verschaltet werden können. Jede Spule wird sowohl eingangsseitig als auch gegen Masse durch Ableiter gegen Überspannungen geschützt.

Die Primärwicklung ist für die doppelte Nennleistung ausgelegt, während die Sekundär- und Tertiärwicklung nur für die Nennleistung konzipiert sind. Die Tertiärwicklung kann auch als Erregerwicklung verwendet werden, was die Parallelschaltung von zwei aufeinander stehenden Modulen ermöglicht. Dies ist jedoch, im Vergleich zu zwei nebeneinander stehenden Modulen, mit einer Leistungseinbuße verbunden, die im Bedarfsfall durch eine Kompensationsdrossel zur Anpassung der Kurzschlußspannungen kompensiert werden kann.

Es gibt drei Baureihen des Typs PZT, die sich in der Leistung unterscheiden:

- PZT 400 - 1 ("kleines" Modul ohne Kühldeckel)	Nennspannung:	400 kV
	Dauerleistung:	160 kVA
	Kurzzeitleistung:	400 kVA
	Kaskadierbar:	3 Module
- PZT 400 - 1,5 ("kleines" Modul mit Kühldeckel)	Nennspannung:	400 kV
	Dauerleistung:	200 kVA
	Kurzzeitleistung:	600 kVA
	Kaskadierbar:	4 Module
- PZT 400 - 4 ("großes" Modul mit Kühldeckel)	Nennspannung:	400 kV
	Dauerleistung:	600 kVA
	Kurzzeitleistung:	1600 kVA
	Kaskadierbar:	4 Module

Die Kühlungsart der Baureihen PZT ist ONAN, d. h. die Wicklungen sind ölgekühlt mit natürlicher Konvektion und die gesamte Kaskade luftgekühlt, ebenfalls mit natürlicher Konvektion. Der Luftaustausch mit der Umwelt erfolgt über ein Silicagelvorgelege, das seitlich am Deckel des Transformators angebracht ist.

Standardmäßig wird die Transformatorkaskade mit einem Fahrgestell geliefert, dessen Spurbreite frei wählbar ist. Auf Wunsch kann das Fahrgestell mit einem Motorantrieb ausgestattet werden. Auch eine Montage der Transformatorkaskade auf ein Luftkissenfahrgestell ist möglich, setzt aber eine sehr gute Beschaffenheit des Hallenbodens voraus.

Bezüglich der weiteren Fragen wie Stelltransformator, Kompensation, TE - Messung usw. ergeben sich für die PZT keinen neuen Gesichtspunkte. Hier gelten die gleichen Zusammenhänge, wie sie bereits bei den TES und PZT beschrieben wurden, so daß an dieser Stelle nicht noch einmal auf diese Fragen eingegangen werden muß.

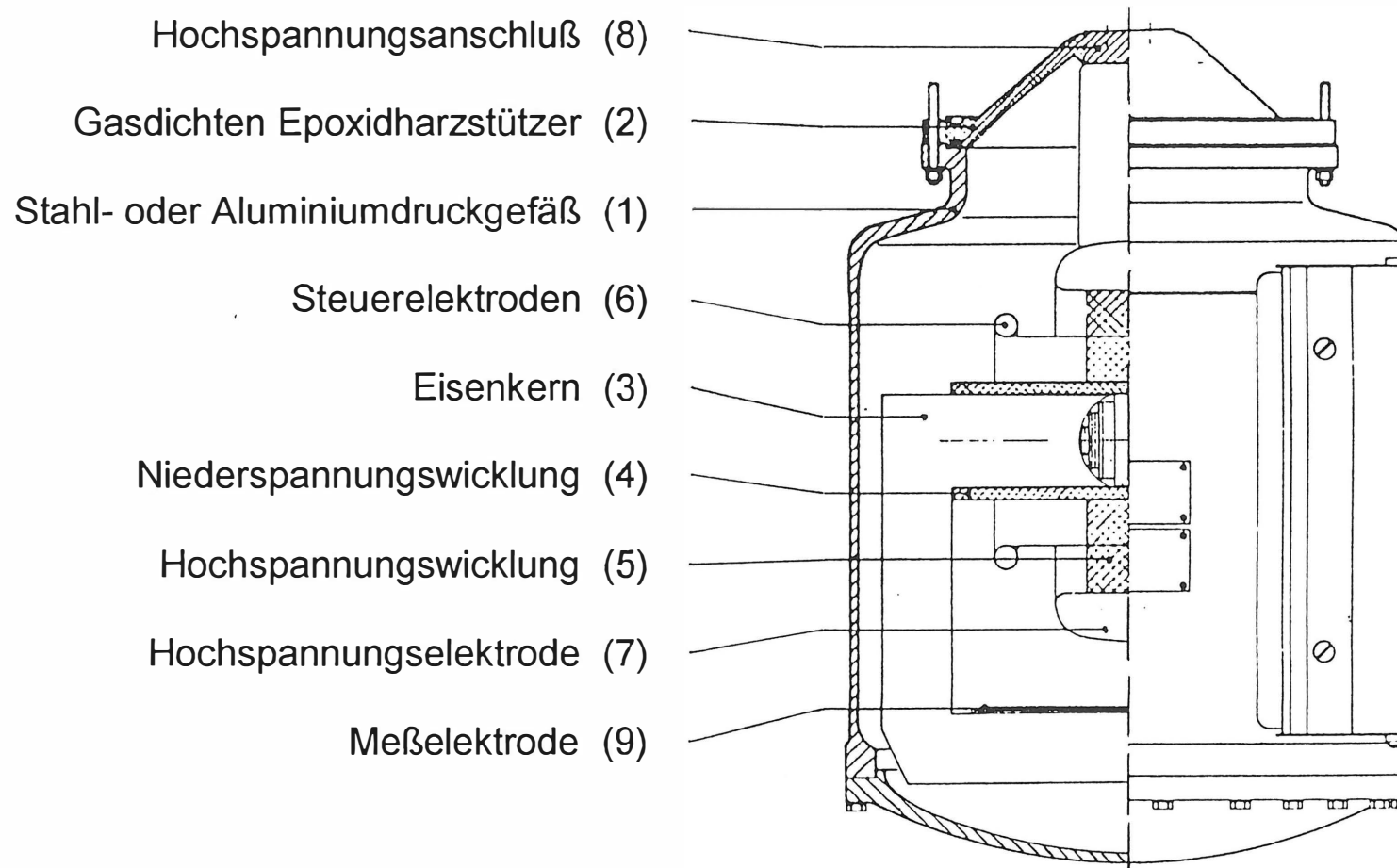


Bild 1: SF6 - isolierter AC - Prüftransformator, Typ TES (Transformator **E**inphasig **SF6** - isoliert)

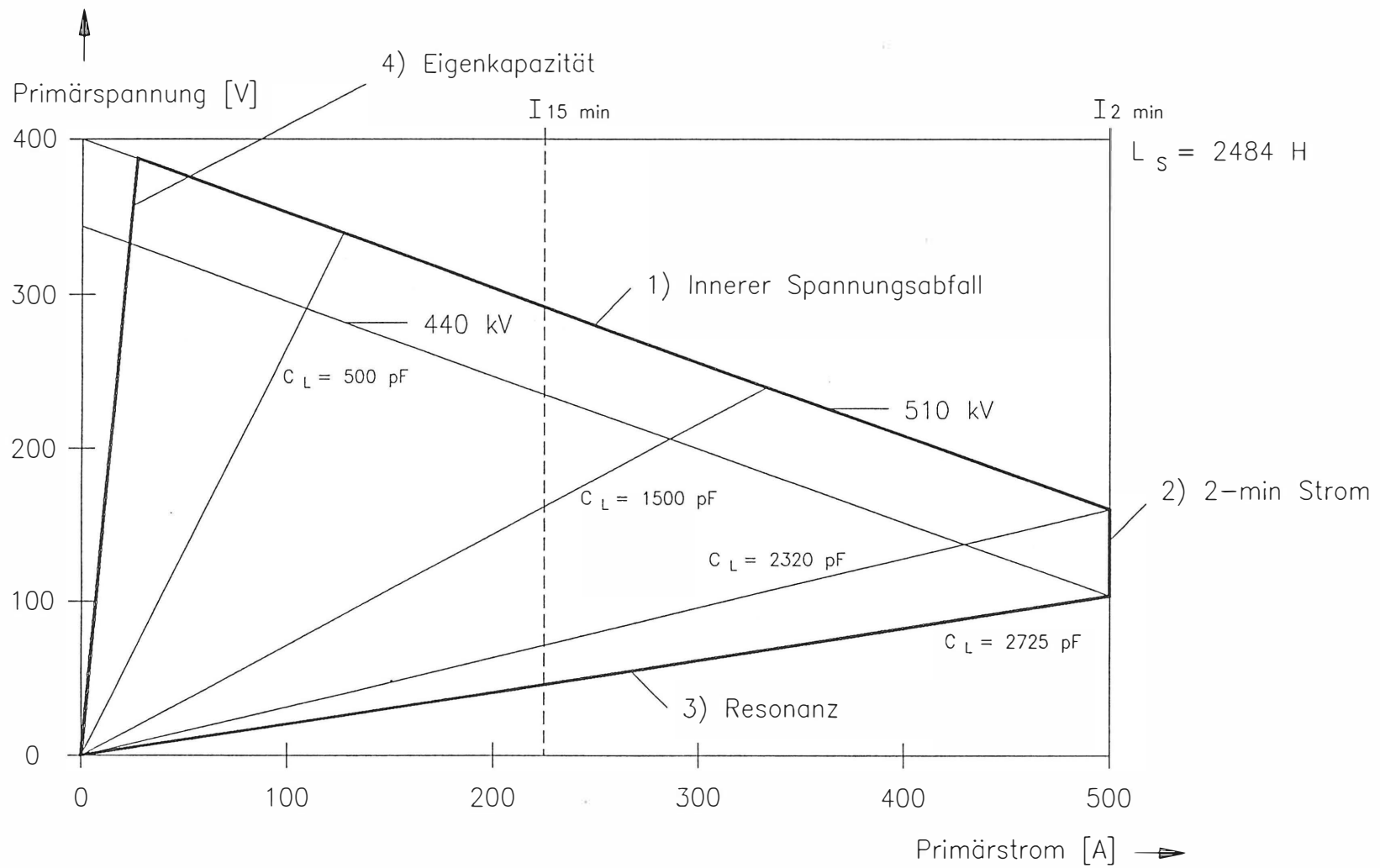


Bild 2: Lastdiagramm für einen TES 510/90 mit einer Sekundärspannung von 510 kV

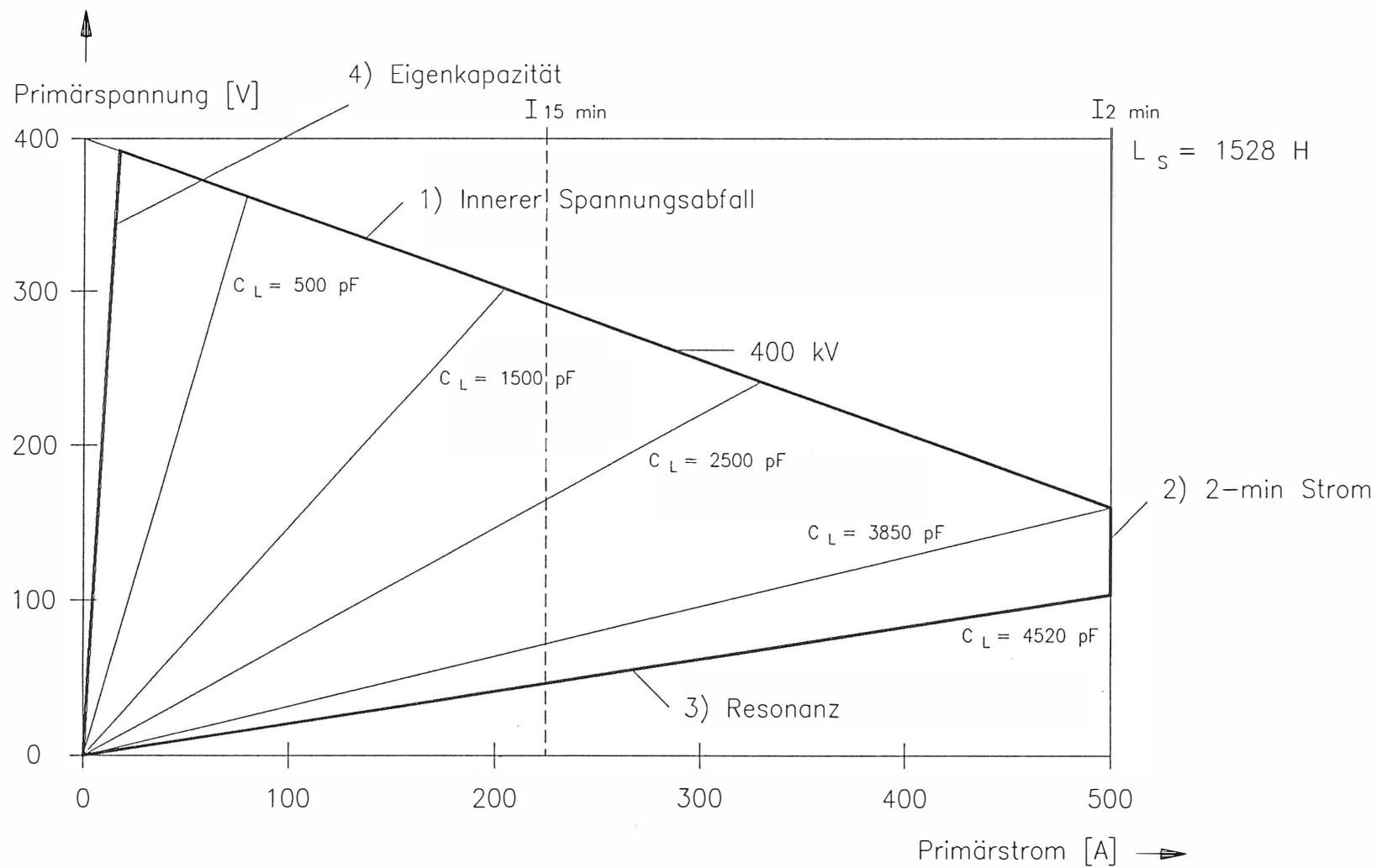


Bild 3: Lastdiagramm für einen TES 510/90 mit einer Sekundärspannung von 400 kV

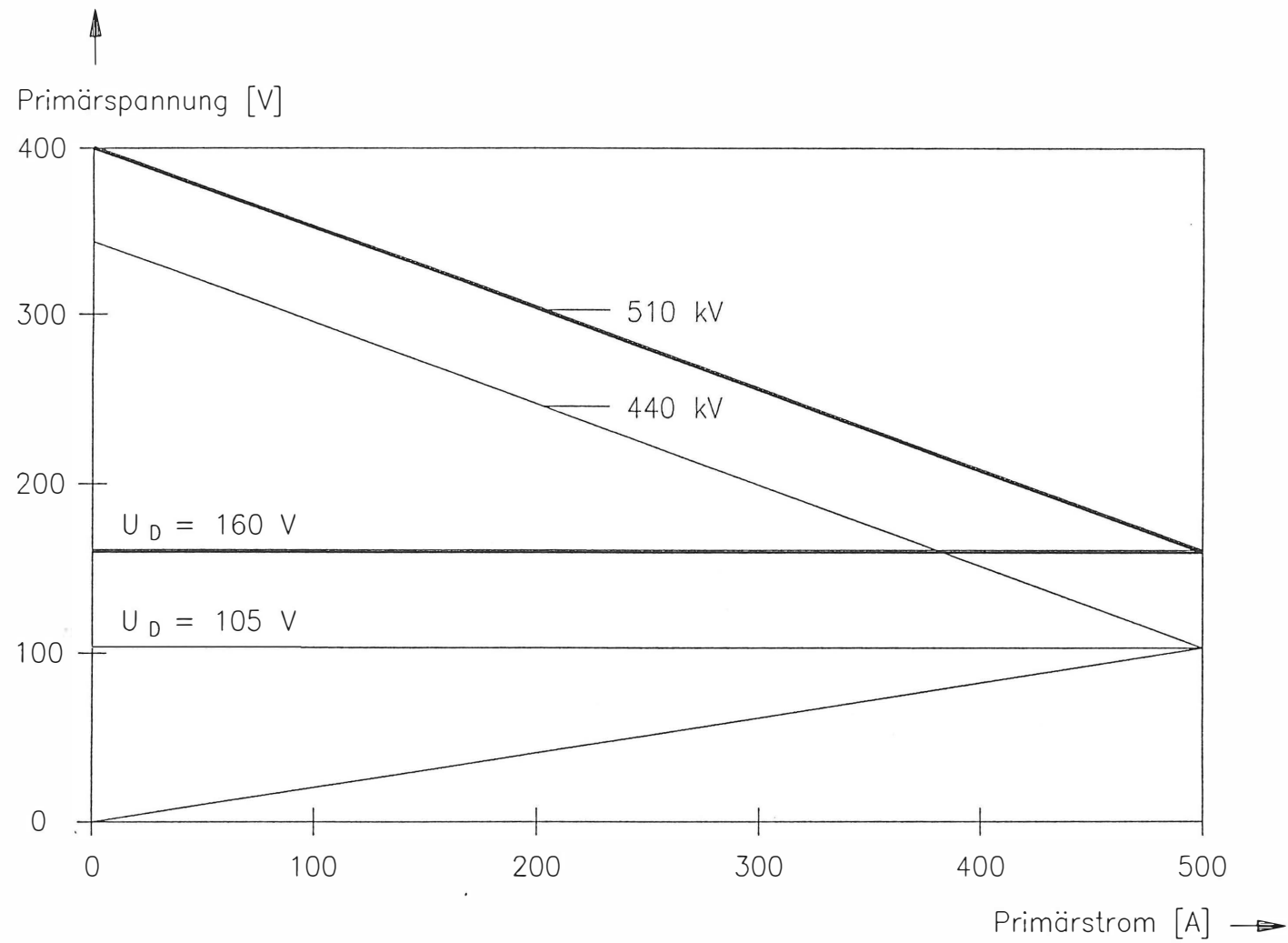


Bild 4: Auslegung der Kompensationsdrossel