



(12) **Gebrauchsmusterschrift**

(21) Aktenzeichen: **20 2016 006 211.6**

(51) Int Cl.: **G01R 27/16** (2006.01)

(22) Anmeldetag: **09.10.2016**

(47) Eintragungstag: **12.12.2017**

(45) Bekanntmachungstag im Patentblatt: **18.01.2018**

(73) Name und Wohnsitz des Inhabers:
**Haag - Elektronische Meßgeräte GmbH, 65620
Waldbrunn, DE**

(74) Name und Wohnsitz des Vertreters:
Janke, Inge, Dipl.-Ing.(FH), 65620 Waldbrunn, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Messanordnung zur spektral aufgelösten Messung der Impedanz von Stromversorgungsnetzen**

(57) Hauptanspruch: Messanordnung zur spektral aufgelösten Messung der Impedanz von Stromversorgungsnetzen zur Beurteilung des Netzzustands, dadurch gekennzeichnet,

dass die erfindungsgemäße Messanordnung in einem einphasigen Stromversorgungsnetz zwei Opto-Triacs (1, 2) aufweist und

dass der erste Opto-Triac (S_{T1}) (1) mit einem Ohmschen Testlastwiderstand (3) verbunden ist und

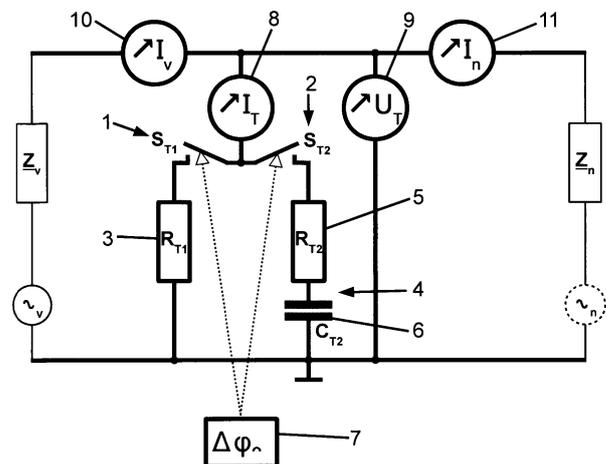
dass der zweite Opto-Triac (S_{T2}) (2) mit einem RC-Testlastwiderstand (4) verbunden ist, der aus einer Serienschaltung aus einem Ohmschen Widerstand (R_{T2}) (5) und einem Kondensator (C_{T2}) (6) besteht und

dass eine Steuereinheit (7) vorgesehen ist, welche die beiden Opto-Triacs (S_{T1} , S_{T2}) (1, 2) zu vorgegebenen Halbwellenphasenwinkeln (φ_{\sim}) öffnet und auf diese Weise Testlastströme (I_T) mit mehreren einander überlagerten Frequenzen erzeugt und

dass zur Messung der Testlastströme (I_T)
– ein Transientenrekorder zur Messung der Testlastströme ($\nearrow I_T$) (8) und

– mindestens ein Transientenrekorder ($\nearrow I_V$) zur Messung der Ströme in den zu messenden Impedanzen (Z_v , Z_n , $Z_1 \dots Z_X$, $Z_{v,N \leftrightarrow PE}$, $Z_{n,N \leftrightarrow PE}$) mit den Opto-Triacs (S_{T1} , S_{T2}) (1, 2) verbunden ist und

dass ein weiterer Transientenrekorder zur Messung der Messpunktspannung ($\nearrow U_T$) (9) zwischen den Polen eines Messpunktes angeordnet ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Messanordnung zur spektral aufgelösten Messung der Impedanz an Messpunkten in Stromversorgungsnetzen zur Beurteilung des Netzzustands, nachfolgend als Diagnostische Impedanzmessung bezeichnet.

[0002] Messungen der Impedanz des Stromversorgungsnetzes erfolgen alltäglich und dienen verschiedenen Zwecken. Wechselrichter in dezentralen Energieerzeugungsanlagen vollführen eine kontinuierliche und schnelle Impedanzmessung des Netzes, um im Falle ungewollter Versinselung die Einspeisung aus Sicherheitsgründen sofort zu beenden, siehe DE 19504271 C1, DE 19522496 C1, DE 19820965 A1, DE 19910288 A1, DE 10 2011 054 002 B4. Ladeeinheiten von Elektroautos messen vor jedem Ladevorgang die Netzimpedanz, um Überlastungen des speisenden Netzes und/oder der Zuleitung zu vermeiden. In beiden Fällen reichen Impedanzmessungen bei oder nahe der Nennfrequenz des Netzes, wie auch in DE 10 2014 216 020 A1 beschrieben.

[0003] Die Impedanz ist eine bestimmte, frequenzabhängige Messgröße. Messungen der Impedanz über einen bestimmten Frequenzbereich liefern als Ergebnis das Impedanzspektrum Z_{ω} dieses Frequenzbereichs. Das Impedanzspektrum des Stromversorgungsnetzes hängt von vielen Details des konkreten Netzes auf der speisenden und auf der Verbraucherseite in Bezug auf einen gegebenen Netzpunkt ab. Schon das Anschließen eines nicht eingeschalteten Verbrauchers kann die Netzimpedanz aufgrund seiner Entstörkondensatoren beeinflussen. Das Stromversorgungsnetz mit seiner Nennfrequenz von 50 Hz in Europa transportiert elektrische Energie gewollt wie ungewollt auch bei weit höheren Frequenzen.

[0004] Trägerfrequenzanlagen speisen gezielt Signale zur Informationsübertragung ein, z. B. Rundsteuersignale bis 2 kHz, bis 9% der Nennspannung, einige KW, Babyfone ~100 kHz, wenige W und Powerline Communication 2 MHz bis 70 MHz, wenige W.

[0005] Eine primär unbeabsichtigte, aber kaum vermeidbare Einspeisung höherer Frequenzen ins Netz erfolgt durch viele Betriebsmittel, sowohl durch Verbraucher als auch durch Generatoren. Einfache Gleichrichterschaltungen und Phasenanschnittsteuerungen erzeugen Oberschwingungsströme bei Vielfachen der Netzfrequenz bis ~5 kHz, getaktete Stromrichter erzeugen Ströme bei ihrer Taktfrequenz und deren Vielfachen bis ~1 MHz.

[0006] Höherfrequente Elektroenergie kann in Stromversorgungsnetzen zu Fehlfunktionen führen.

Kapazitäts- und Induktivitätsbelag von Netzleitungen sowie Betriebsmittel mit kapazitiver oder induktiver Charakteristik können in Stromversorgungsnetzen zu Resonanzen führen, deren Resonanzfrequenz und -güte mit dem Betriebszustand des Netzes stark variieren.

[0007] Resonanzen können eine vorgesehene Informationsübertragung über das Netz durch Kurzschließen oder Blockieren der Trägerfrequenzsignale stören. Wenn die jeweiligen Resonanzfrequenzen angeregt werden, kommt es in Serienresonanzen zu überhöhter Spannungsbelastung, in Parallelresonanzen zu überhöhter Strombelastung von Betriebsmitteln. Steht genügend Anregungsenergie bei einer Resonanzfrequenz mit geringer Dämpfung zur Verfügung, kann es zum Ansprechen von Sicherungen sowie zur Überlastung und sogar zur Zerstörung von Betriebsmitteln kommen.

[0008] Solch widrige Umstände treten in realen Netzen oft nur vorübergehend und zu unvorhersagbaren Zeitpunkten auf. Sie entziehen sich weitgehend einer rechnerischen Vorhersage, sind aber mit diagnostischen Impedanzmessungen analysierbar. Diagnostische Impedanzmessungen im Stromversorgungsnetz erfassen das Impedanzspektrum an einem gegebenen Netzanschlusspunkt und damit die Güte und Resonanzfrequenz von Resonanzstellen.

[0009] Zahlreiche Typen von Betriebsmitteln arbeiten mit kondensatorgepufferten Zwischenstromkreisen, die nur während der Spannungsmaxima der Halbwellen über Gleichrichter nachgeladen werden. Während des Nachladens sind die Gleichrichterdiode durchgeschaltet, zu den anderen Zeiten der Halbwelle sperren sie. Während des geschlossenen Zustands der Dioden sind die Pufferkondensatoren vom Netz isoliert und haben folglich keinen Einfluss auf dessen Impedanz. Bei offenen Dioden sind die Pufferkondensatoren mit dem Netz verbunden und beeinflussen die Netzimpedanz. Bei Frequenzen deutlich oberhalb der Nennfrequenz, mit Periodendauern deutlich unterhalb der Nenn-Periodendauer des Netzes, ist daher zu erwarten, dass die Impedanz periodisch in Abhängigkeit vom Phasenwinkel der Netzspannung fluktuiert und dass dabei vorübergehend schädliche Resonanzen entstehen, die mit bisheriger Messtechnik nicht messbar sind.

[0010] Das Prinzip von Impedanzmessungen in Stromversorgungsnetzen lässt sich wie folgt zusammenfassen: Jede Form der Messung einer elektrischen Impedanz Z beruht darauf, dass die in einem Prüfling von einem bekannten Teststrom hervorgerufene Spannungsänderung gemessen wird oder umgekehrt, dass die von einer bekannten Spannungsänderung hervorgerufene Stromänderung gemessen wird. Bei diagnostischen Impedanzmessungen an einem willkürlichen Messpunkt im Stromversorgungs-

netz kann zwischen den Impedanzen beiderseits des Messpunktes, nämlich der Impedanz des vorgelagerten Netzzweigs Z_v und der Impedanz des nachgelagerten Netzzweiges Z_n unterschieden werden. In 3-phasigen Netzen erfolgt die Messung der zusammengehörigen vorgelagerten Impedanzen Z_{vLx} und nachgelagerten Impedanzen Z_{nLx} durch technisch prinzipiell gleiche Vorrichtungen. Deswegen werden im Folgenden nur einphasige Impedanzmessungen betrachtet.

[0011] Um Impedanzspektren zu messen, müssen Testströme mit allen interessierenden Frequenzen appliziert und die Spannungsänderungen bei diesen Frequenzen analysiert werden.

[0012] Breitbandige diagnostische Impedanzmessungen in Stromversorgungsnetzen unterliegen darüber hinaus dem Zwang, selbst möglichst geringe Netzrückwirkungen zu erzeugen. Sie müssen ferner im normalen Betrieb des Netzes durchgeführt werden, da die untersuchten Phänomene, wie Resonanzen, essentiell vom Betriebszustand des Netzes abhängen.

[0013] Um das Impedanzspektrum eines Stromversorgungsnetzes zu messen, kann man die Testströme der verschiedenen Frequenzen nacheinander einspeisen. Im Extremfall erfolgt dies mittels eines sinusförmigen Teststroms, der zu jedem Zeitpunkt nur eine Frequenz enthält, die langsam und kontinuierlich gewobbelt oder in Stufen variiert wird. Dieses klassische Verfahren wird heute noch zur Impedanzmessung des Netzes bei höheren Frequenzen ab ~ 1 MHz angewandt. Ein Nachteil dieser Methode ist die relativ lange Messdauer oder geringe Frequenzauflösung. Bei niedrigen Frequenzen ist es zudem oft schwierig, die vom Testsignal hervorgerufenen Spannungsänderungen vom unbeeinflussten Netzspannungsverlauf zu unterscheiden.

[0014] Bekannt ist auch die Nutzung der Kompensationsströme Aktiver Netzfilter zur spektral auflösenden Messung der Impedanz zwischen einem Neutralleiter und den Außenleiter-Phasen, beispielsweise aus der JP H10111329.

[0015] Alternativ kann man Teststromverläufe nutzen, die gleichzeitig mehrere einander überlagerte Frequenzen enthalten. Ein solches Netzimpedanzmessgerät ist von der Anmelderin als „EWS 120“ bekannt. Dieses Gerät schaltet per Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode, auch IGBT genannt, eine Ohmsche Last pro Phase in pseudozufälligen Zeitabständen und mit pseudozufälliger Einschaltdauer ein und aus. Die so entstehenden Testströme enthalten ein breitbandiges Frequenzgemisch mit annähernd gleicher Spektraldichte, das auch als weißes Rauschen bekannt ist. Die zugehörige Spannungsänderung errechnet sich als Differenz der Spannungs-

verläufe während inaktiver Referenzperioden ohne Testströme minus der Spannungsverläufe von aktiven Perioden, während derer die Testströme fließen. Die Dauer der Teststromverläufe des „EWS 120“ beträgt einige 100 ms, während derer die Lastströme pro Phasenleiter eine mittlere Verlustleistung von mehreren 100 W erzeugen. Darüber hinaus entstehen erhebliche Netzrückwirkungen: Das Spektrum der Teststromverläufe geht signifikant über das Band des untersuchten Impedanzspektrums, welches 3 Hz bis 20 kHz beträgt, hinaus und wird vom untersuchten Stromversorgungsnetz in erheblichem Maß abgestrahlt, was zu Rundfunkstörungen führen kann. Weil die Teststromverläufe über mehrere komplette Perioden bei Nennfrequenz mitteln, sind mit diesem Netzimpedanzmessgerät Variationen der Impedanz in Abhängigkeit vom Grundfrequenzphasenwinkel nicht messbar.

[0016] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Messanordnung zur spektral aufgelösten Messung der Impedanz von Stromversorgungsnetzen zur Beurteilung des Netzzustands der eingangs genannten Art so zu verbessern, dass die erwähnten Nachteile vermieden werden und dass auch solche Impedanzen, wie vorübergehend auftauchende schädliche Resonanzen, gemessen werden können. Es ist auch Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Messanordnung zur spektral aufgelösten Messung der Impedanz von Stromversorgungsnetzen zu schaffen, die insbesondere auf einfache Weise bei sicherer Funktion platzsparender aufgebaut und flexibel eingesetzt werden kann.

[0017] Diese Aufgabe wird durch die im Schutzanspruch 1 aufgeführten Merkmale gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0018] Dieses Ziel wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, dass dem Netz während beider Halbwellen aktiver Netzperioden zu festen Halbwellenphasenwinkeln Φ_n mit Hilfe von Opto-Triacs S_{T1} , S_{T2} oder mit äquivalent funktionierenden Thyristorschaltungen R-Testlasten R_{T1} oder alternativ RC-Testlasten R_{T2} , C_{T2} zugeschaltet werden. Dabei wird ausgenutzt, dass sich Triacs wie selbsthaltende Taster verhalten, die, einmal eingeschaltet, so lange leitend bleiben, bis ein typspezifischer Haltestrom unterschritten wird. Danach sind sie nichtleitend, bis sie wieder eingeschaltet werden. Die Zuschaltung der Testlasten erzeugt in den zu messenden Impedanzen Z_v , Z_n , $Z_1 \dots Z_x$, $Z_{v,N \leftrightarrow PE}$, $Z_{n,N \leftrightarrow PE}$ Stromänderungen und Spannungsänderungen mit breitbandigen Flanken, die als Differenz der Strom- und Spannungsverläufe von aktiven Netzperioden und von Referenzperioden ohne Testlast-Zuschaltung gemessen werden, wobei die komplexe Division der Spektren der Spannungsänderungsverläufe durch die Spektren der Stromände-

rungsverläufe die gesuchten Impedanzspektren ergibt.

[0019] Erfindungsgemäß weisen die mit RC-Testlasten R_{T2} , C_{T2} erzeugten Strompulse I_T und Spannungspulse Zeitkonstanten τ in der Größenordnung 100 μs auf und sind damit in der Pulsdauer um etwa den Faktor 20 kürzer als die Netzperiodendauer. Dadurch geben die erhaltenen Spektren die Impedanz \underline{Z} zum Zeitpunkt des Halbwellenphasenwinkels φ wieder. Zwischen den Einzelmessungen werden die Halbwellenphasenwinkel φ automatisch variiert, wodurch man die Impedanzspektren als Funktion des Halbwellenphasenwinkels φ erhält.

[0020] Die erfindungsgemäße Messanordnung weist in einem einphasigen Stromversorgungsnetz zwei Opto-Triacs auf, wobei der erste Opto-Triac S_{T1} mit einem Ohmschen Testwiderstand R_{T1} verbunden ist und der zweiten Opto-Triac S_{T2} mit einem RC-Testlastwiderstand verbunden ist, der aus einer Serienschaltung aus einem Ohmschen Widerstand und einem Kondensator besteht und wobei eine Steuereinheit die beiden Opto-Triacs S_{T1} , S_{T2} öffnet und auf diese Weise Testlastströme mit mehreren einander überlagerten Frequenzen zu vorgegebenen Halbwellenphasenwinkeln φ erzeugt. Zur Messung der Testlastströme I_T sind

- ein Transientenrekorder zur Messung der Testlastströme $\nearrow I_T$ und
- mindestens ein Transientenrekorder $\nearrow I_V$ zur Messung der Ströme in den zu messenden Impedanzen \underline{Z}_V , \underline{Z}_N , $\underline{Z}_1 \dots \underline{Z}_X$, $\underline{Z}_{V,N \leftrightarrow PE}$, $\underline{Z}_{N,N \leftrightarrow PE}$

mit den Opto-Triacs S_{T1} , S_{T2} verbunden und ein weiterer Transientenrekorder zur Messung der Messpunktspannung U_T ist zwischen den Polen eines Messpunktes angeordnet. Die Messbereiche der Transientenrekorder, insbesondere der Transientenrekorder zur Strommessung ($\nearrow I_V$, $\nearrow I_T$, $\nearrow I_N$, $\nearrow I_1$, $\nearrow I_2$, bis $\nearrow I_X$) sind dynamisch oder statisch umschaltbar ausgeführt. Auf diese Weise sind die Stromänderungen zur Impedanzberechnung in allen Betriebszuständen mit einem optimalen Signal-Rausch-Verhältnis erfassbar.

[0021] Erfindungsgemäß sind auch der Ohmsche R-Testlastwiderstand und der RC-Testlastwiderstand in ihren Werten statisch oder dynamisch verstellbar ausgeführt, damit für jeden Betriebszustand und jede Impedanz \underline{Z} des jeweils untersuchten Netzknotens bei einer optimalen Spannungsänderung ΔU_T für ein maximales Signal-Rausch-Verhältnis bei minimaler Verlustleistung und Netzurückwirkung eingestellt werden kann.

[0022] Erfindungsgemäß können an Stelle der beiden Opto-Triacs S_{T1} , S_{T2} äquivalent funktionierende Thyristorschaltungen S_{T1} , S_{T2} zum Einsatz kommen.

[0023] Die Erfindung wird im Folgenden noch anhand der in den Zeichnungen auszugsweise und teilweise schematisch dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert.

[0024] Fig. 1 zeigt dabei das Prinzipschaltbild eines ersten Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Messanordnung zur Diagnostischen Impedanzmessung in einem einphasigen Stromversorgungsnetz. Die elektronischen Schalter, hier Opto-Triacs S_{T1} , S_{T2} oder damit äquivalent funktionierenden Thyristorschaltungen sind zum besseren Verständnis hier und in den folgenden Abbildungen vereinfacht als Symbole für Schalter dargestellt.

[0025] Fig. 2 verdeutlicht den zeitlichen Zusammenhang der Rohdaten von Messpunktspannung U_T , dargestellt im oberen Bereich, Testlastströmen I_T durch RC-Testlast, dargestellt im mittleren Bereich und Strömen in dem nachgelagerten, lastseitigen Netzzweig I_n , dargestellt im unteren Bereich, wobei der nachgelagerte lastseitige Netzzweig I_n aus einer Parallelschaltung einer 60-W Glühlampe und einem Computer-Netzteil besteht.

[0026] Fig. 3 zeigt gemittelte Verläufe von Messpunktspannung U_T , Testlaststrom I_T durch RC-Testlast und Strom in den nachgelagerten, lastseitigen Netzzweig I_n aus den Rohdaten der aktiven Perioden eines Durchlaufs.

[0027] Fig. 4 weist zum Vergleich miteinander zwei bildliche Darstellungen auf und zeigt links zeitlich gestreckte Verläufe von U_T , I_T und I_n wie in Fig. 3 und rechts durch Subtraktion der Signale von Referenzperioden daraus berechnete Verläufe von ΔU_T und ΔI_n , sowie die per Logistik-Funktion realisierten Übergänge zu den geglätteten Signalbereichen außerhalb der Testpuls-Zeit.

[0028] Fig. 5 zeigt das Prinzipschaltbild eines weiteren Ausführungsbeispiels der erfindungsgemäßen Messanordnung zur Diagnostischen Impedanzmessung in einem Netzknoten mit X Abzweigen in einer einphasigen Darstellung.

[0029] Fig. 6 zeigt das Prinzipschaltbild eines dritten Ausführungsbeispiels der erfindungsgemäßen Messanordnung zur Messung der Impedanzen \underline{Z} zwischen Neutralleiter N und geerdetem Schutzleiter vor dem Anschlusspunkt $\underline{Z}_{V,N \leftrightarrow PE}$ und hinter dem Anschlusspunkt $\underline{Z}_{N,N \leftrightarrow PE}$.

[0030] Fig. 7 weist zwei bildliche Darstellungen zum Vergleich miteinander auf und zeigt in beiden bildlichen Darstellungen Impedanzbeträge als Funktion von Frequenzen 600 Hz bis 32 kHz und von Halbwellenphasenwinkeln φ 30° bis 150°, mit

- Impedanzbeträgen im Bereich 1Ω bis 15Ω in der linken bildlichen Darstellung des vorgelagerten Netzes und
- Impedanzbeträgen im Bereich 10Ω bis 750Ω in der rechten bildlichen Darstellung des nachgelagerten Netzes.

[0031] Fig. 8 weist zwei bildliche Darstellungen zum Vergleich miteinander auf und zeigt in beiden bildlichen Darstellungen von Impedanzbeträgen als Funktion der Frequenzen 600 Hz bis 32 kHz analog Fig. 7, jedoch bei Halbwellenphasenwinkeln von $\Phi_{\wedge} = 47^\circ$, 93° und 141° ,

- links, im vorgelagerten Netz und
- rechts, im nachgelagerten Netz.

[0032] Die erfindungsgemäßen Messanordnungen zur Impedanzmessung nach den Fig. 1 bis Fig. 8 arbeiten mit Testströmen I_T , die zahlreiche Frequenzen gleichzeitig enthalten. Zur Erzeugung der Testströme I_T werden dem elektrischen Netz an einem Messpunkt der Messanordnung nach Fig. 1 über eine Steuereinheit 7, welche geeignete, bis zur Unterschreitung ihres Haltestromes selbst offenhaltende elektronische Schalter einschaltet, alternativ R- bzw. RC-Testlasten hinzugefügt. In diesem Ausführungsbeispiel kommen als elektronische Schalter Opto-Triacs 1, 2 zum Einsatz. Es wird entweder mittels eines ersten Opto-Triacs S_{T1} 1, der mit einem Ohmschen R-Testlastwiderstand 3 verbunden ist, eine Ohmsche R-Testlast R_{T1} zugeschaltet oder mittels eines zweiten Opto-Triacs S_{T2} 2, der mit einem RC-Testlastwiderstand 4 verbunden ist, eine RC-Testlast R_{T2} , C_{T2} zugeschaltet, wobei der RC-Testlastwiderstand 4 aus einer Serienschaltung aus einem Ohmschen Widerstand 5 und einem Kondensator 6 besteht. Die Zuschaltung erfolgt während beider Halbwellen einer aktiven Netzperiode bei dem gleichen Halbwellenphasenwinkel Φ_{\wedge} , wobei der Halbwellenphasenwinkel Φ_{\wedge} der auf den jeweiligen Spannungs-Halbwellenbeginn bezogene Phasenwinkel ist.

[0033] Anstelle der beiden Opto-Triacs S_{T1} 1 und S_{T2} 2 können erfindungsgemäß auch äquivalent funktionierende Thyristorschaltungen S_{T1} , S_{T2} zum Einsatz kommen.

[0034] Die beiden Opto-Triacs 1, 2 sind mit einem Transientenrekorder zur Messung der Testlastströme I_T 8 verbunden. Der Testlaststrom I_T verändert die Messpunktspannung U_T um den Betrag ΔU_T , was wiederum den Strom aus dem vorgelagerten Netzweig I_v und den Strom in den nachgelagerten Netzweig I_n um die Beträge ΔI_v und ΔI_n verändert. Die Messpunktspannung U_T , der Strom aus dem vorgelagerten Netzweig I_v und der Strom in den nachgelagerten Netzweig I_n werden als Zeitverläufe gemessen. Die Abtastfrequenz muss nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem mindestens zweimal so hoch sein wie die höchste in den zu messen-

den Impedanzspektren vorkommende Frequenz. Dazu dienen folgende synchron aufzeichnende Transientenrekorder: Transientenrekorder zur Messung der Spannung im Messpunkt $\nearrow U_T$ 9, Transientenrekorder zur Messung des Stroms aus dem vorgelagerten Netz zum Messpunkt $\nearrow I_v$ 10, Transientenrekorder zur Messung des Stroms in dem nachgelagerten, lastseitigen Netzweig $\nearrow I_n$ 11 und Transientenrekorder zur Messung des Testlaststroms durch die R-Testlast R_{T1} oder durch die RC-Testlast $\nearrow I_T$ 8. Einer der beiden Transientenrekorder $\nearrow I_v$, $\nearrow I_n$ 10, 11 kann entfallen, da wegen

$$I_v + I_n + I_T = 0$$

entweder I_v oder I_n jeweils als

$$I_v = -(I_T + I_n)$$

bzw.

$$I_n = -(I_T + I_v)$$

aus den Transienten der jeweils anderen zwei Transientenrekorder zu berechnen ist. Der Transientenrekorder zur Messung des Testlaststroms durch die R-Testlast R_{T1} oder durch die RC-Testlast $\nearrow I_T$ kann den Verlauf des Testlaststroms I_T direkt messen. Der Testlaststrom I_T sollte direkt gemessen werden, weil damit der Zeitpunkt der Testlaststrom-Einsätze direkt und genau zu erfassen ist. Die von den Testlastströmen I_T verursachten transienten Verläufe der Spannungs- und Stromänderungen ΔU_T , ΔI_v und ΔI_n erhält man durch Subtraktion der Transienten während inaktiver Referenznetzperioden ohne Teststrom-Fluss von den Spannungs- und Stromtransienten aktiver Netzperioden, während derer der Testlaststrom I_T geflossen ist. Die Referenznetzperioden sollten zeitlich möglichst nahe bei den aktiven Netzperioden liegen, damit zwischen aktiven und Referenz-Netzperioden im Netz möglichst wenige Laständerungen passieren. Solche Laständerungen gehen als Verfälschung in die Berechnung von ΔU_T , ΔI_v und ΔI_n ein.

[0035] Eine Spektralanalyse der Verläufe der Spannungs- und Stromänderungen ΔU_T , ΔI_v und ΔI_n mittels der schnellen Fourier-Transformation, auch FFT genannt, liefert die Spektren der Spannungs- und Stromtransienten $\Delta U_{T,\omega}$, $\Delta I_{v,\omega}$ und $\Delta I_{n,\omega}$. Eine komplexe Division dieser Spektren liefert die gesuchten Impedanzspektren $\underline{Z}_{v,\omega}$ bzw. $\underline{Z}_{n,\omega}$ der Impedanzen des vorgelagerten Netzes $\underline{Z}_{v,\omega}$ und des nachgelagerten Netzes $\underline{Z}_{n,\omega}$ nach den Gleichungen

$$\underline{Z}_{v,\omega} = \Delta U_{T,\omega} / \Delta I_{v,\omega}$$

und

$$\underline{Z}_{n,\omega} = \Delta U_{T,\omega} / \Delta I_{n,\omega}$$

[0036] Die unterschiedlichen Testlasten R_{T1} sowie R_{T2} und C_{T2} dienen der Messung verschiedener Frequenzanteile des Impedanzspektrums.

[0037] Der erste Opto-Triac S_{T1} **1** und der Ohmsche R-Testlastwiderstand **3** mit der R-Testlast R_{T1} bilden eine klassische Dimmer Phasenanschnittsteuerung. Der erste Testlaststrom I_{T1} durch die Ohmsche R-Testlast R_{T1} , beginnt beim Schließen des ersten Opto-Triacs S_{T1} **1** mit einer steilen Flanke und fließt, bis der Haltestrom kurz vor dem nächsten Spannungsnulldurchgang unterschritten wird und der erste Opto-Triac S_{T1} **1** wieder öffnet.

[0038] Die dabei erhaltenen Spektren der Spannungs- und Stromtransienten $\Delta U_{T,\omega}$, $\Delta I_{V,\omega}$ und $\Delta I_{n,\omega}$ eignen sich vorzugsweise zur Messung der niederfrequenten Anteile des Impedanzspektrums. Die Einschaltflanke des ersten Testlaststroms I_{T1} enthält zwar ein weites Spektrum an Frequenzen, aber relativ weniger höhere Frequenzanteile als der zweite Testlaststrom I_{T2} , der durch den RC-Testlastwiderstand **4** fließt.

[0039] Der zweite Testlaststrom I_{T2} beginnt wie der erste Testlaststrom I_{T1} mit einer steilen Flanke, deren Höhe vom Halbwellenphasenwinkel Φ^{\wedge} abhängt, klingt dann aber mit der RC-Zeitkonstante τ ab, bis der Haltestrom unterschritten wird und der zweite Opto-Triac S_{T2} **2** wieder öffnet.

[0040] Da die Dauer des zweiten Testlaststroms I_{T2} deutlich kürzer als die Halbwelldauer der Netzfrequenz ist, lassen sich das Impedanzspektrum des vorgelagerten Netzes $\underline{Z}_{v,\omega}$ und das Impedanzspektrum des nachgelagerten Netzes $\underline{Z}_{n,\omega}$ für verschiedene Halbwellenphasenwinkel Φ^{\wedge} separat bestimmen.

[0041] Die im Folgenden beschriebenen Verfahrensschritte dienen dazu, die Messgenauigkeit deutlich zu verbessern bzw. bei gleicher Genauigkeit die Messdauer zu verkürzen oder die nötige Verlustleistung zu reduzieren.

[0042] Zur Berechnung der Impedanz \underline{Z} bis 50 kHz ist nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem eine Abtastfrequenz von mindestens 100 kHz nötig. Um aber die Spektren der Spannungs- und Stromtransienten $\Delta U_{T,\omega}$, $\Delta I_{V,\omega}$ und $\Delta I_{n,\omega}$ ohne Artefakte schnell per FFT berechnen zu können, muss die Dauer einer oder mehrerer ganzzahliger Perioden der Grundschwingung mit genau 2^N Samples abgetastet werden. Zur Berechnung der Impedanz \underline{Z} bis 50 kHz müsste daher bei genau 50 Hz Netzfrequenz eine Abtastfrequenz $F_{abt,soll}$ von 102,400 kHz gewählt werden. Die Abtastfrequenz $F_{abt,soll}$ ist den Abweichungen der Netzfrequenz von 50 Hz proportional nachzuführen. Das lässt sich über eine Steuerung von A/D-Wandlern mittels Phasenregelschleife, auch als PLL bezeichnet, erreichen. Erfolgt die Digitalisierung der

Ströme und Spannungen statt mit einer PLL mit preisgünstigen, mehrkanaligen Transientenrekordern mit diskreten, festen Abtastraten, hat es sich als vorteilhaft erwiesen, mittels eines im Folgenden als Marshalling bezeichneten Verfahrens das Verhalten einer PLL rechnerisch weitgehend nachzubilden. Dazu werden die Messpunktspannung U_T , der Testlaststrom I_T , der Strom aus dem vorgelagerten Netzweig I_V oder der Strom aus dem nachgelagerten Netzweig I_n mit einem mehrfachen, aber nicht notwendigerweise ganzzahligen Vielfachen, dem 4-fachen und mehr, von der Abtastfrequenz $F_{abt,soll}$ abgetastet. In den mit diesem, auch als Überabtastung oder Oversampling bekannten Verfahren gewonnenen Rohsamples der Messpunktspannung U_T werden mittels linearer Regression die genauen Zeitpunkte der Spannungsnulldurchgänge und damit nebenbei die aktuelle Netzfrequenz bestimmt. Daraus werden die virtuellen Abtastzeiten berechnet, die nötig sind, damit genau 2^N Samples – zum Beispiel 2048 – in die tatsächliche Netzperiodendauer passen. Eine Lineare Interpolation im gleitenden Mittelwert der überabgetasteten Daten von U_T , I_T , I_V und I_n ergibt dann die Abtastwerte von U_T , I_T , I_V und I_n zu den virtuellen Abtastzeiten, im Folgenden als U_T^m , I_T^m , I_V^m und I_n^m bezeichnet.

[0043] Die Opto-Triacs S_{T1} **1** oder S_{T2} **2** oder die äquivalent funktionierenden Thyristorschaltungen zum Zuschalten des Ohmschen R-Testlastwiderstands **3** mit der R-Testlast R_{T1} oder des RC-Testlastwiderstands **4** mit der RC-Testlast R_{T2} , C_{T2} schließen nicht exakt zum vorgesehenen Halbwellenphasenwinkel Φ^{\wedge} . Eine Ursache für diesen technisch bedingten Phasenjitter von bis zu etwa 2° ist die Unsicherheit der Bestimmung der Zeiten der Spannungsnulldurchgänge durch die Steuerschaltung der Steuereinheit **7**, in den **Fig. 1**, **Fig. 5** und **Fig. 6** mit $\Delta\Phi^{\wedge}$ bezeichnet. Diese Unsicherheit ergibt sich unter anderem aus Abweichungen des Netzspannungsverlaufs realer Netze von der Sinusform und dem etwas unterschiedlichen Verhalten von Opto-Triacs **1**, **2** während positiver und negativer Halbwellen.

[0044] Das Rauschen in den gewonnenen Impedanzspektren lässt sich auf zwei Arten vermindern: Durch größere Testlastströme I_T , was mehr Verlustleistung und mehr Netzurückwirkungen verursacht und durch Averagen mehrerer Verläufe der Spannungs- und Stromänderungen ΔU_T , ΔI_V und ΔI_n , was zu längeren Messdauern führt.

[0045] Direktes Averagen mehrerer Verläufe der Spannungs- und Stromänderungen ΔU_T , ΔI_V und ΔI_n zur Rauschminderung führt wegen des Phasenjitters des Halbwellenphasenwinkels Φ^{\wedge} zu Fehlern. Die gemittelten Verläufe von ΔU_T , ΔI_V und ΔI_n wären verschmiert und abgerundet und würden dadurch ein stark tiefpassgefiltertes Spektrum aufweisen. Daher hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Zeitverläufe der Halbwellen vor der Summierung zum Avera-

gen so zu verschieben, dass die führenden Flanken im Teststrom I_T bei der Mittelung zusammenfallen.

[0046] In den erfindungsgemäßen Messanordnungen nach den **Fig. 1**, **Fig. 5** und **Fig. 6** sind die Transientenrekorder zur Messung der Messpunktspannung ΔU_T **9** zwischen den Polen eines Messpunktes angeordnet. Auch haben sich bei den Durchlaufen mit Schaltungen mit dem zweiten Opto-Triac S_{T2} **2** die in **Fig. 2** gezeigten Schaltmuster aus acht Netzperioden als zweckmäßig erwiesen. Der zweite Opto-Triac S_{T2} **2** wurde während beider Halbwellen der Perioden Eins, Drei, Fünf und Sieben bei gleichem Halbwellenphasenwinkel Φ geschlossen. Die Perioden Zwei, Vier, Sechs und Acht dienten als Referenznetzperioden. Die so erhaltenen vier Verläufe der Spannungs- und Stromänderungen ΔU_T , ΔI_V und ΔI_n , wurden, wie beschrieben, auf die führenden Flanken zentriert geaveragt, dargestellt in den **Fig. 3** und **Fig. 4**. Falls Spektralinformationen mehrerer solcher Durchläufe mit nominal identischen Halbwellenphasenwinkeln Φ verfügbar waren, wurden diese ebenfalls gemittelt.

[0047] Das Rauschen in den gewonnenen Impedanzspektren lässt sich weiter reduzieren, indem in Transienten mit Testlastströmen durch den RC-Testlastwiderstand **4** die Signalanteile von ΔU_T , ΔI_V und ΔI_n außerhalb der Testpulszeiten geglättet bzw. auf Null gesetzt werden, siehe **Fig. 4**. Signalsprünge im Übergangsbereich zu den geglätteten Signalanteilen könnten nicht vorhandene Frequenzanteile in den Spektren vortäuschen. Deshalb nimmt die Wichtung des ungefilterten Signals im Übergangsbereich zu den geglätteten Signalanteilen entsprechend einer Logistik-Funktion zu bzw. ab, dargestellt in **Fig. 4**.

[0048] Die in **Fig. 5** dargestellte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Messanordnung funktioniert auch in Netzknoten mit einer größeren Anzahl X von Abzweigen, wenn die Stromverläufe aller Abzweige einzeln erfasst werden. Eine Unterscheidung in generatorseitige und verbraucherseitige Abzweige ist nicht nötig. Somit funktioniert diese Ausführungsform auch in Netzknoten, in die viele dezentrale Energieerzeugungsanlagen einspeisen. Lediglich mindestens einer der Abzweige muss eine formal als innenwiderstandsfrei betrachtete Wechselspannungsquelle \sim_v , \sim_n , \sim_1 , \sim_x aufweisen.

[0049] Eine weitere, in **Fig. 6** skizzierte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Messanordnung misst nicht, wie oben beschrieben, die vor- und nachgelagerten Impedanzen \underline{Z}_v und \underline{Z}_n des speisenden Stromkreises, sondern die eines anderen Stromkreises, der nur mindestens am Messpunkt mit dem speisenden Stromkreis verbunden sein muss. Das Beispiel in **Fig. 6** zeigt dies am Beispiel der dem Messpunkt vor- und nachgelagerten Impedanzen $\underline{Z}_{v,N \rightarrow PE}$ und $\underline{Z}_{n,N \rightarrow PE}$ zwischen Neutralleiter N und PE-Schutz-

leiter. Spannungs- und Stromänderungen ΔU_T , ΔI_V und ΔI_n müssen dazu, wie oben beschrieben, im Kreis zwischen Neutralleiter N und PE-Schutzleiter gemessen werden.

[0050] In einer vorteilhaften erfindungsgemäßen Ausführungsform der erfindungsgemäßen Messanordnung analog **Fig. 5** sind die Messbereiche der Transientenrekorder, insbesondere der Transientenrekorder zur Strommessung ΔI_V , ΔI_T , ΔI_n , ΔI_1 , ΔI_2 , bis ΔI_X dynamisch oder statisch umschaltbar, um die Stromänderungen zur Impedanzberechnung in allen Betriebszuständen mit optimalem Signal-Rausch-Verhältnis erfassen zu können.

[0051] In einer weiteren vorteilhaften erfindungsgemäßen Ausführungsform der erfindungsgemäßen Messanordnung sind die Ohmsche R -Testlast R_{T1} und die RC-Testlast aus R_{T2} und C_{T2} in ihren Werten an Betriebszustand und Impedanz des untersuchten Netzknotens statisch oder dynamisch anpassbar. Kleinere Testlast-Widerstände bewirken mehr Verlustleistung und mehr störende Netzzrückwirkungen, bewirken aber auch ein größeres ΔU_T und damit ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis. Die Spannungsänderung ΔU_T hängt darüber hinaus von den mit dem untersuchten Netzknoten verbundenen Impedanzen ab. Eine Variation der Testlast-Werte erlaubt daher eine Optimierung des Arbeitspunktes in diesem Zielkonflikt.

[0052] Gegenüber dem Stand der Technik weist die erfindungsgemäße Lösung folgende Vorteile auf:

- Die Spektraldichte der erfindungsgemäß zur Impedanzmessung genutzten Testpulsströme nimmt zu höheren Frequenzen hin stark ab und ist außerhalb des untersuchten Frequenzbereichs vernachlässigbar. Dies ist zweckmäßig, denn in Stromversorgungsnetzen nehmen das Strom- und Spannungsrauschen mit der Frequenz ab, die Abstrahlung der leitungsgebundenen Energie in den Raum aber zu. So ist das Signal-Rausch-Verhältnis innerhalb des Frequenzbereichs der Impedanzspektren angepasst, während die Störungen durch Abstrahlung minimiert sind. Beides trägt auch dazu bei, dass die zur Messung nötige mittlere Verlustleistung gegenüber dem Messgerät der Anmelderin „EWS 120“ erheblich reduziert ist, nämlich in Niederspannungsnetzen auf Größenordnungsmäßig wenige 10 W pro Phase. So kann ein Gerät für diagnostische Impedanzmessungen in Niederspannungsnetzen hutschienen-tauglich und damit schaltschrankfreundlich aufgebaut werden.

- Die erfindungsgemäße Messanordnung schaltet die Testpulsströme nicht wie das „EWS 120“ mit IGBTs, sondern mit Opto-Triacs **1**, **2** oder mit äquivalent funktionierenden Thyristorschaltungen. Triacs und Thyristoren sind robuste Bauelemente, die auch für große Spannungen und Ströme güns-

tig verfügbar sind. Ein Scale-Up für Netze mit höheren Leistungen ist daher unter Beibehaltung des Messverfahrens mit relativ geringem Aufwand möglich.

– Die Erfindung ermöglicht es, die Impedanz \underline{Z} als Funktion des Halbwellenphasenwinkels Φ^{\wedge} zu bestimmen. Die Relevanz dieser Möglichkeit zeigt sich schon mit einer teilweise realisierten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Messanordnung. Damit wird unter bestimmten Bedingungen eine ausgeprägte, systematische Variation von \underline{Z} mit Φ^{\wedge} gefunden, ausgeführt in den **Fig. 7** und **Fig. 8**. Bei bestimmten Frequenzen ändert sich der Impedanzbetrag $|Z|$ mit dem Halbwellenphasenwinkel Φ^{\wedge} um mehr als den Faktor 25.

– Während einer Messung treten nur ein physikalisch unvermeidbares Minimum an Netzurückwirkungen im elektrischen Netz auf.

– Mit der erfindungsgemäßen Messanordnung können in Netzleitungen mit kapazitiver oder induktiver Charakteristik auch solche Resonanzen gemessen werden, deren Resonanzfrequenz und -güte mit dem Betriebszustand und/oder mit dem Phasenwinkel der Grundschwingung des Netzes stark variieren.

I_V Strom aus dem vorgelagerten Netz zum Messpunkt

I_T Strom durch die R- oder RC-Testlast

I_n Strom in den nachgelagerten (lastseitigen)

Netzzweig

$\nearrow I_1, \nearrow I_2, \dots, \nearrow I_X$ Transientenrekorder zur Messung der Ströme in den X Abzweigen eines Netzknotens

R_{T1} Ohmsche R-Testlast

R_{T2} Ohmscher Anteil der RC-Testlast

C_{T2} Kapazitiver Anteil der RC-Testlast

Bezugszeichenliste

1 erster Opto-Triac S_{T1}

2 zweiter Opto-Triac S_{T2}

3 Ohmscher R-Testlastwiderstand

4 RC-Testlastwiderstand

5 Ohmscher Widerstand

6 Kondensator

7 Steuereinheit $\Delta\Phi^{\wedge}$

8 Transientenrekorder zur Messung der Testströme durch die R- oder RC-Testlast $\nearrow I_T$

9 Transientenrekorder zur Messung der Spannung im Messpunkt $\nearrow U_T$

10 Transientenrekorder zur Messung des Stroms aus dem vorgelagerten Netz zum Messpunkt $\nearrow I_V$

11 Transientenrekorder zur Messung des Stroms in dem nachgelagerten, lastseitigen Netzzweig

$\nearrow I_n$

Φ^{\wedge} Halbwellenphasenwinkel

$\Delta\Phi^{\wedge}$ Steuereinheit **7**, welche S_{T1} oder S_{T2} bei vorprogrammierten Halbwellenphasenwinkeln Φ^{\wedge} öffnet

\underline{Z}_V Impedanz des vorgelagerten Netzzweiges

\underline{Z}_n Impedanz des nachgelagerten, lastseitigen Netzzweiges

$\underline{Z}_{V,N \rightarrow PE}$ Impedanz zwischen Neutralleiter und Schutzerde des vorgelagerten Netzzweiges

$\underline{Z}_{n,N \rightarrow PE}$ Impedanz zwischen Neutralleiter und Erde des nachgelagerten, lastseitigen Netzzweiges

\sim_V Leerlaufspannung des vorgelagerten Netzzweiges

\sim_n Leerlaufspannung des nachgelagerten, lastseitigen Netzzweiges

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 19504271 C1 [0002]
- DE 19522496 C1 [0002]
- DE 19820965 A1 [0002]
- DE 19910288 A1 [0002]
- DE 102011054002 B4 [0002]
- DE 102014216020 A1 [0002]
- JP 10111329 [0014]

Schutzansprüche

1. Messanordnung zur spektral aufgelösten Messung der Impedanz von Stromversorgungsnetzen zur Beurteilung des Netzzustands,

dadurch gekennzeichnet,

dass die erfindungsgemäße Messanordnung in einem einphasigen Stromversorgungsnetz zwei Opto-Triacs (1, 2) aufweist und

dass der erste Opto-Triac (S_{T1}) (1) mit einem Ohmschen R-Testlastwiderstand (3) verbunden ist und dass der zweite Opto-Triac (S_{T2}) (2) mit einem RC-Testlastwiderstand (4) verbunden ist, der aus einer Serienschaltung aus einem Ohmschen Widerstand (R_{T2}) (5) und einem Kondensator (C_{T2}) (6) besteht und

dass eine Steuereinheit (7) vorgesehen ist, welche die beiden Opto-Triacs (S_{T1} , S_{T2}) (1, 2) zu vorgegebenen Halbwellenphasenwinkeln (φ_{\sim}) öffnet und auf diese Weise Testlastströme (I_T) mit mehreren einander überlagerten Frequenzen erzeugt und dass zur Messung der Testlastströme (I_T)

– ein Transientenrekorder zur Messung der Testlastströme ($\nearrow I_T$) (8) und

– mindestens ein Transientenrekorder ($\nearrow I_V$) zur Messung der Ströme in den zu messenden Impedanzen (Z_V , Z_n , $Z_1 \dots Z_x$, $Z_{V,N \leftrightarrow PE}$, $Z_{n,N \leftrightarrow PE}$) mit den Opto-Triacs (S_{T1} , S_{T2}) (1, 2) verbunden ist und

dass ein weiterer Transientenrekorder zur Messung der Messpunktspannung ($\nearrow U_T$) (9) zwischen den Polen eines Messpunktes angeordnet ist.

2. Messanordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet,** dass an Stelle der beiden Opto-Triacs (S_{T1} , S_{T2}) (1, 2) äquivalent funktionierende Thyristorschaltungen (S_{T1} , S_{T2}) zum Einsatz kommen.

3. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet,** dass vom Ohmschen R-Testlastwiderstand (3) zugeschaltete R-Testlasten (R_{T1}) oder vom RC-Testlastwiderstand (4) zugeschaltete RC-Testlasten (R_{T2} , C_{T2}) in den zu messenden Impedanzen (Z_V , Z_n , $Z_1 \dots Z_x$, $Z_{V,N \leftrightarrow PE}$, $Z_{n,N \leftrightarrow PE}$) Stromänderungen und Spannungsänderungen mit breitbandigen Flanken erzeugen, die als Differenz der Strom- und Spannungsverläufe von aktiven Netzperioden und von Referenzperioden ohne Testlast-Zuschaltung gemessen werden, wobei die komplexe Division der Spektren der Spannungsänderungsverläufe durch die Spektren der Stromänderungsverläufe die gesuchten Impedanzspektren ergibt.

4. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Messbereiche der Transientenrekorder, insbesondere der Transientenrekorder zur Strommessung ($\nearrow I_V$, $\nearrow I_T$, $\nearrow I_n$, $\nearrow I_1$, $\nearrow I_2$, bis $\nearrow I_x$) dynamisch oder statisch umschaltbar sind, um die Stromänderungen zur Impedanzberechnung in allen Betriebszuständen mit optimalem Signal-Rausch-Verhältnis erfassen zu können.

5. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet,** dass der Ohmsche R-Testlastwiderstand (3) und der RC-Testlastwiderstand (4) in ihren Werten statisch oder dynamisch verstellbar sind, um für jeden Betriebszustand und jede Impedanz (des jeweils untersuchten Netzknotens) eine optimale Spannungsänderung (ΔU_T) für ein maximales Signal-Rausch-Verhältnis bei minimaler Verlustleistung und Netzurückwirkung einzustellen.

6. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet,** dass die mit dem RC-Testlastwiderstand (4) erzeugten Strom- und Spannungspulse Zeitkonstanten (τ) in der Größenordnung 100 μs aufweisen und damit in der Pulsdauer um etwa den Faktor 20 kürzer als die Netzperiodendauer sind, wodurch die erhaltenen Spektren die Impedanz (Z) zum Zeitpunkt des Halbwellenphasenwinkels (φ_{\sim}) der führenden Testpulsflanke wiedergeben.

7. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Steuereinheit $\Delta \varphi_{\sim}$ (7) die Halbwellenphasenwinkel (φ_{\sim}) der führenden Testpulsflanken zwischen den Einzelmessungen automatisch variiert, wodurch man die Impedanzspektren als Funktion des Halbwellenphasenwinkels (φ_{\sim}) erhält.

8. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet,** dass bei Messungen an Netzknoten neben der Spannungsänderung bei Bedarf für alle ein- und ausgehenden Strompfade die Stromänderungen $\Delta I_1 \dots \Delta I_x$ und die daraus errechneten Impedanzspektren einzeln messbar sind.

9. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Testlastströme (I_T) aus dem speisenden Stromkreis mit der formal als innewiderstandsfrei betrachteten Wechselspannungsquelle (\sim_V) und der Quellimpedanz (Z_V) in einen angeschlossenen Stromkreis eingespeist werden, der nur mindestens an einem Messpunkt mit dem speisenden Stromkreis verbunden sein muss, um so die dem Messpunkt vorgelagerten Impedanzen (Z_V) und nachgelagerten Impedanzen (Z_n) des angeschlossenen Stromkreises zu messen.

10. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet,** dass zur Beschleunigung der Spektralanalysen mittels schneller Fourier-Transformation, FFT, genau 2^N Samples zur Abbildung der Strom- und Spannungszeitverläufe einer oder mehrerer ganzzahliger aktueller Periodendauern der Grundschwingung genutzt werden, die zuvor durch interpolierende Mittelung aus per Oversampling gewonnenen Datenströmen errechnet werden, was einer rechnerisch realisierten Phasenregelschleife, PLL, entspricht.

11. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass vor einem Averagen von Zeitverläufen zur Rauschverminderung alle Strom- und Spannungszeitverläufe halbwellenweise so auf der Zeitachse verschoben werden, dass die besonders prägnanten Startflanken der Testlastströme (I_T) exakt ineinander fallen.

12. Messanordnung nach Anspruch 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Falle der mit dem RC-Testlastwiderstand (4) erzeugten kurzen Strom- und Spannungspulse die Zeitbereiche der Spannungs- und Stromänderungssignale außerhalb der Testpulse zwecks Rauschunterdrückung zur Glättung auf Null gesetzt werden, wobei die Wichtung des ungefilterten Signals im Übergang zwischen ungefilterten und geglätteten Signalbereichen entsprechend einer Logistik-Funktion zu- bzw. abnimmt, um spektrale Artefakte durch die Glättung zu vermeiden.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

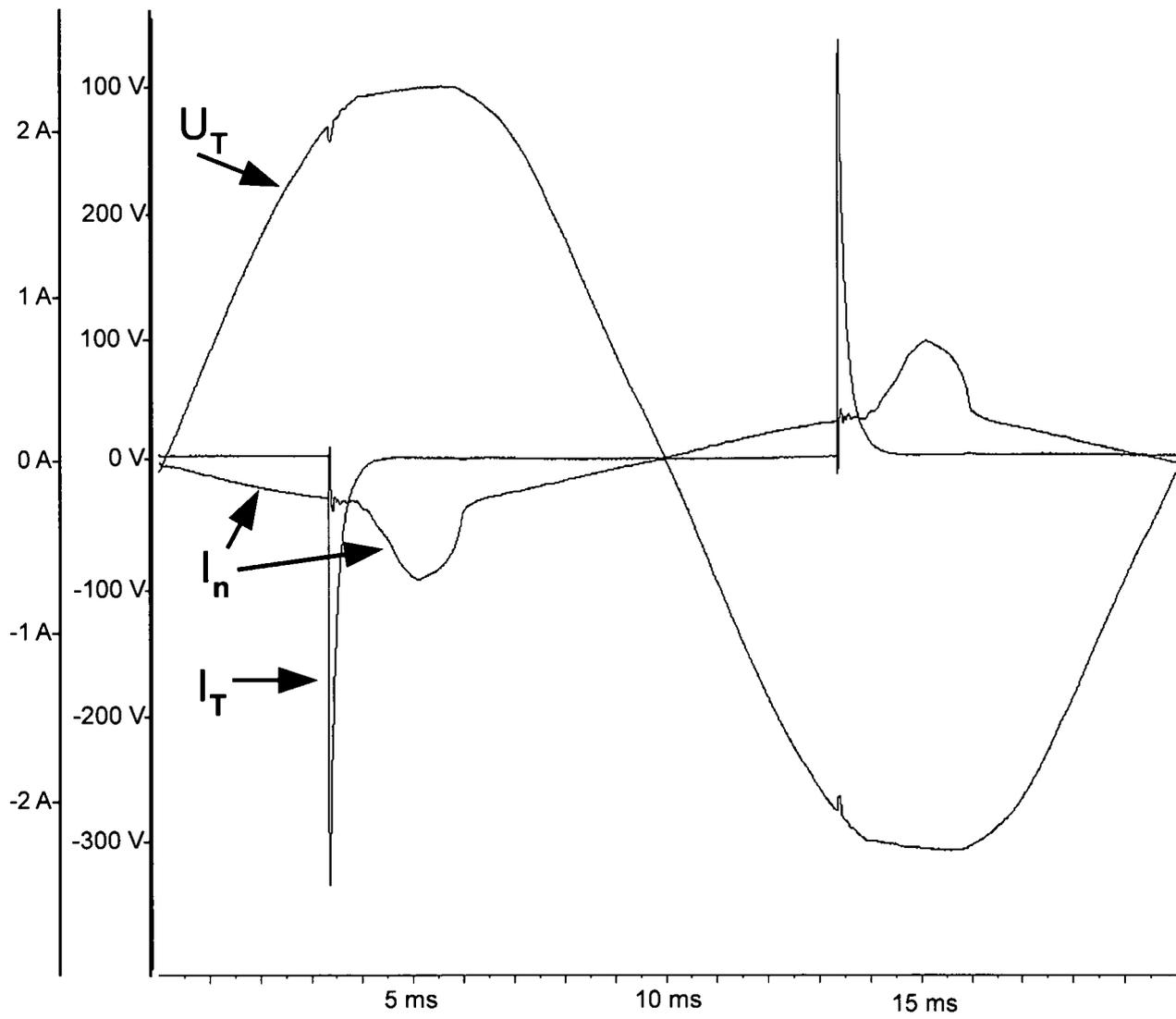


Fig. 3

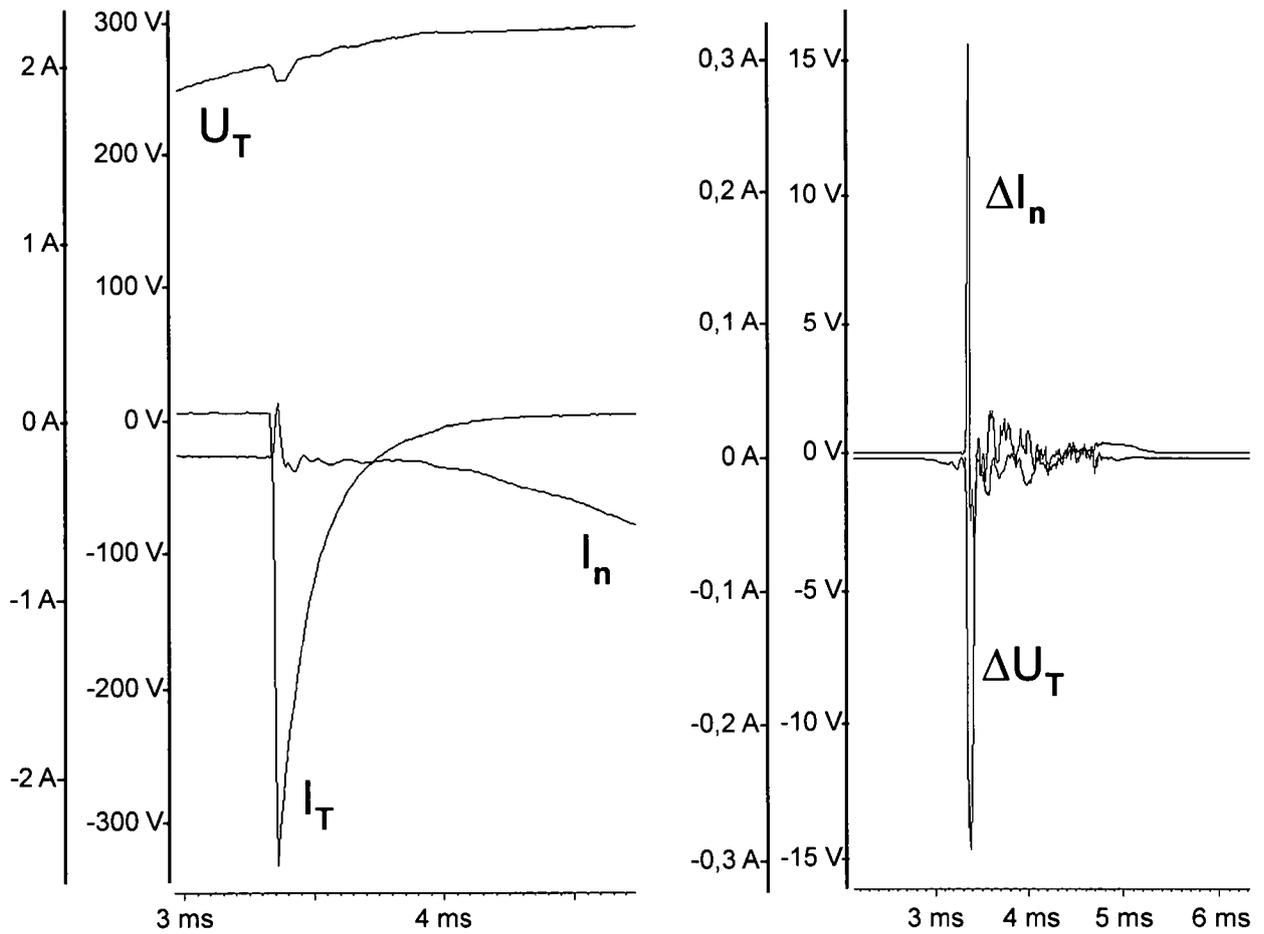


Fig. 4

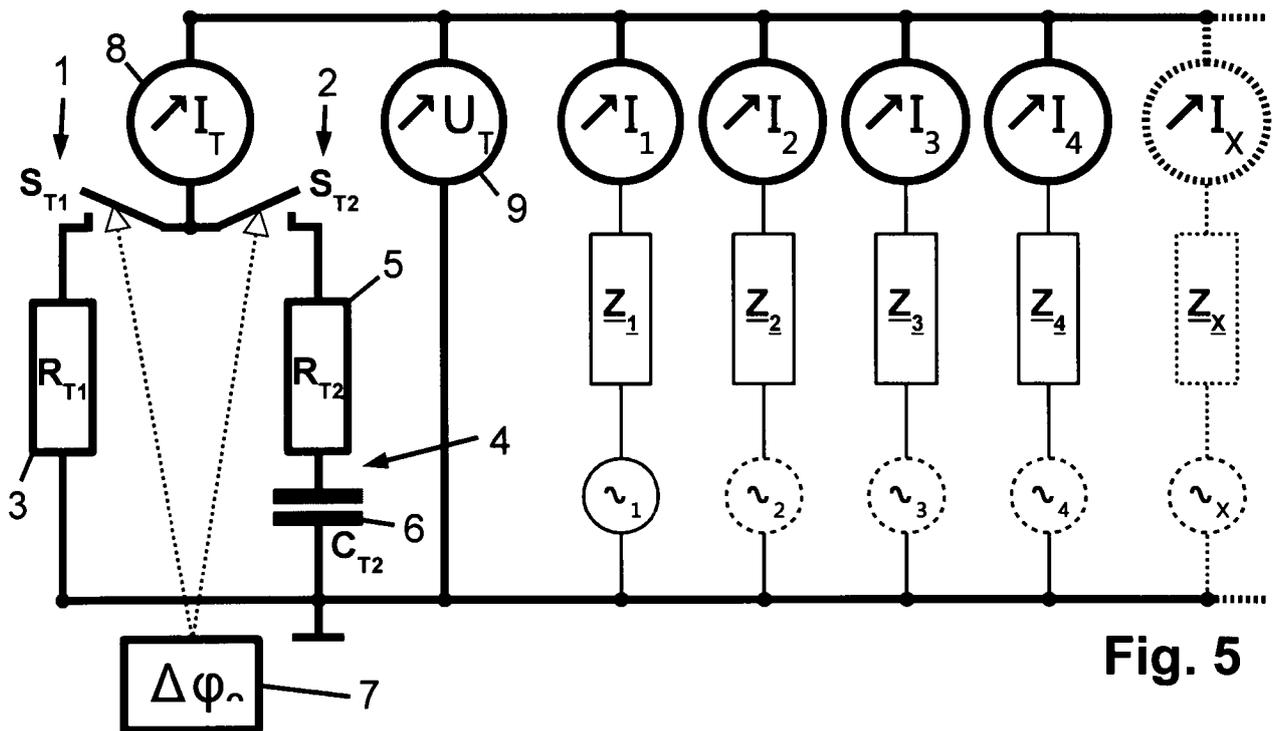


Fig. 5

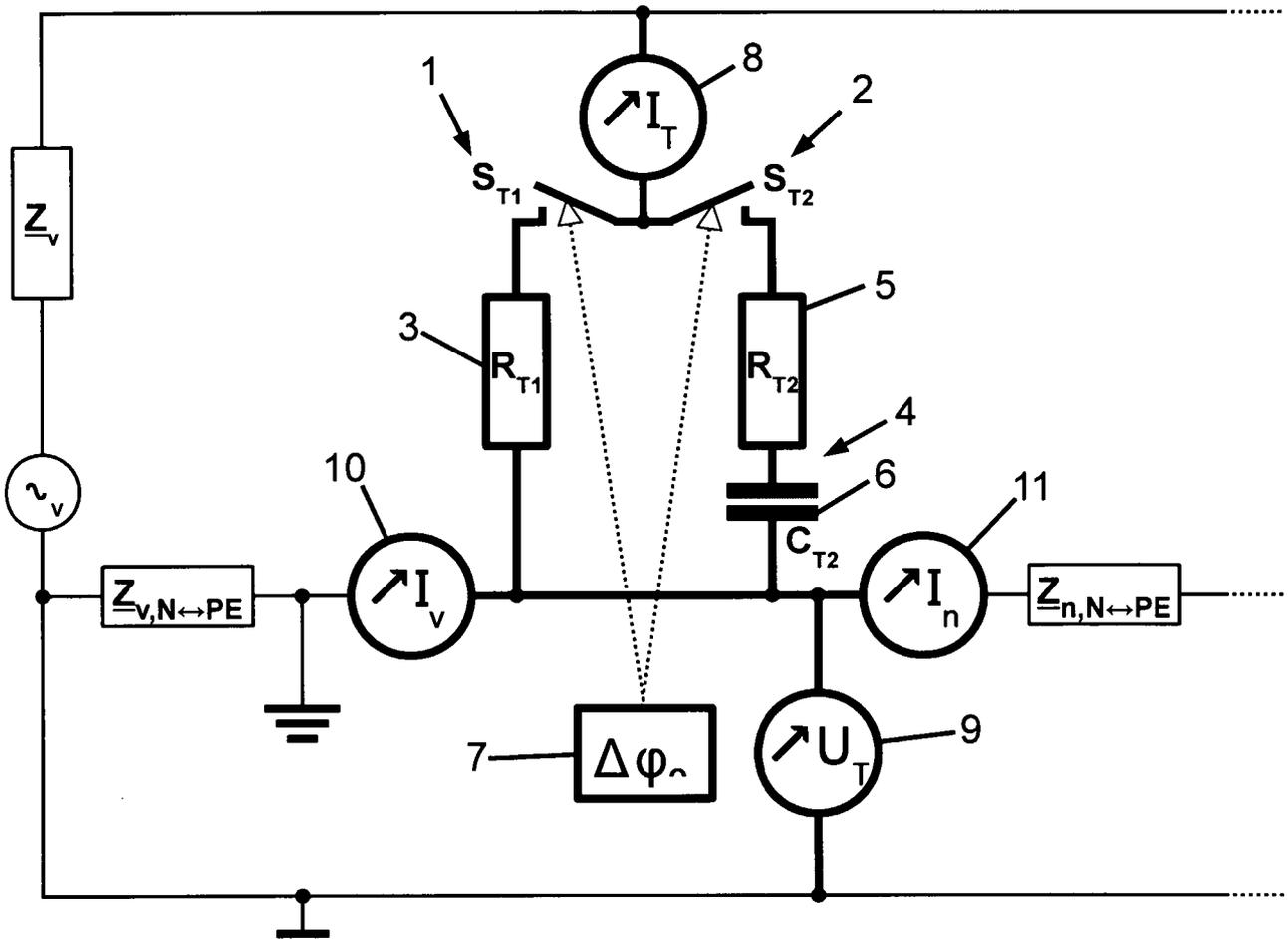


Fig. 6

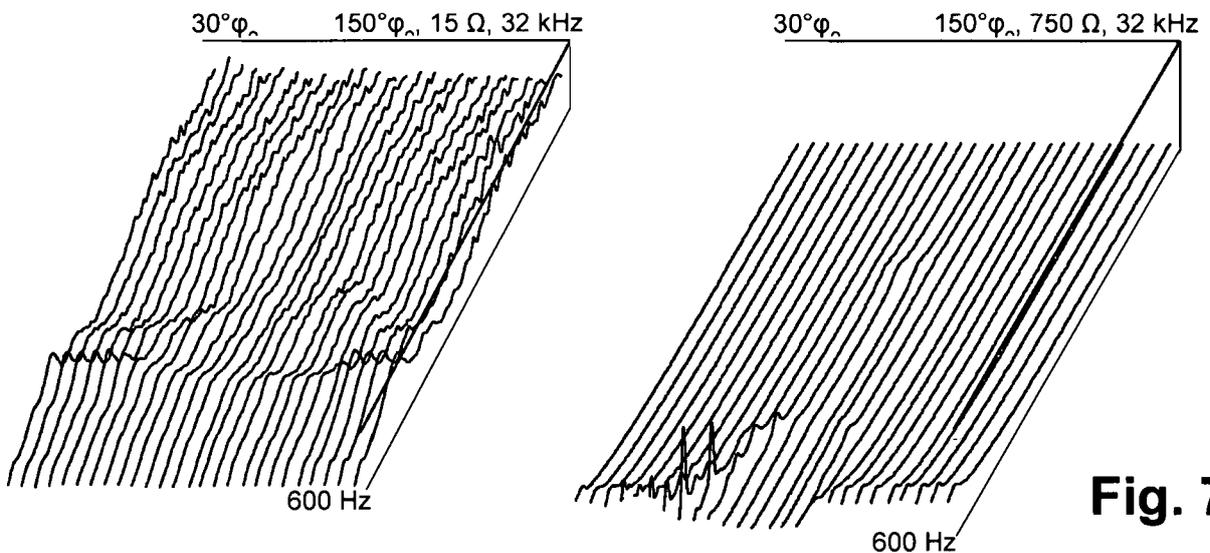


Fig. 7

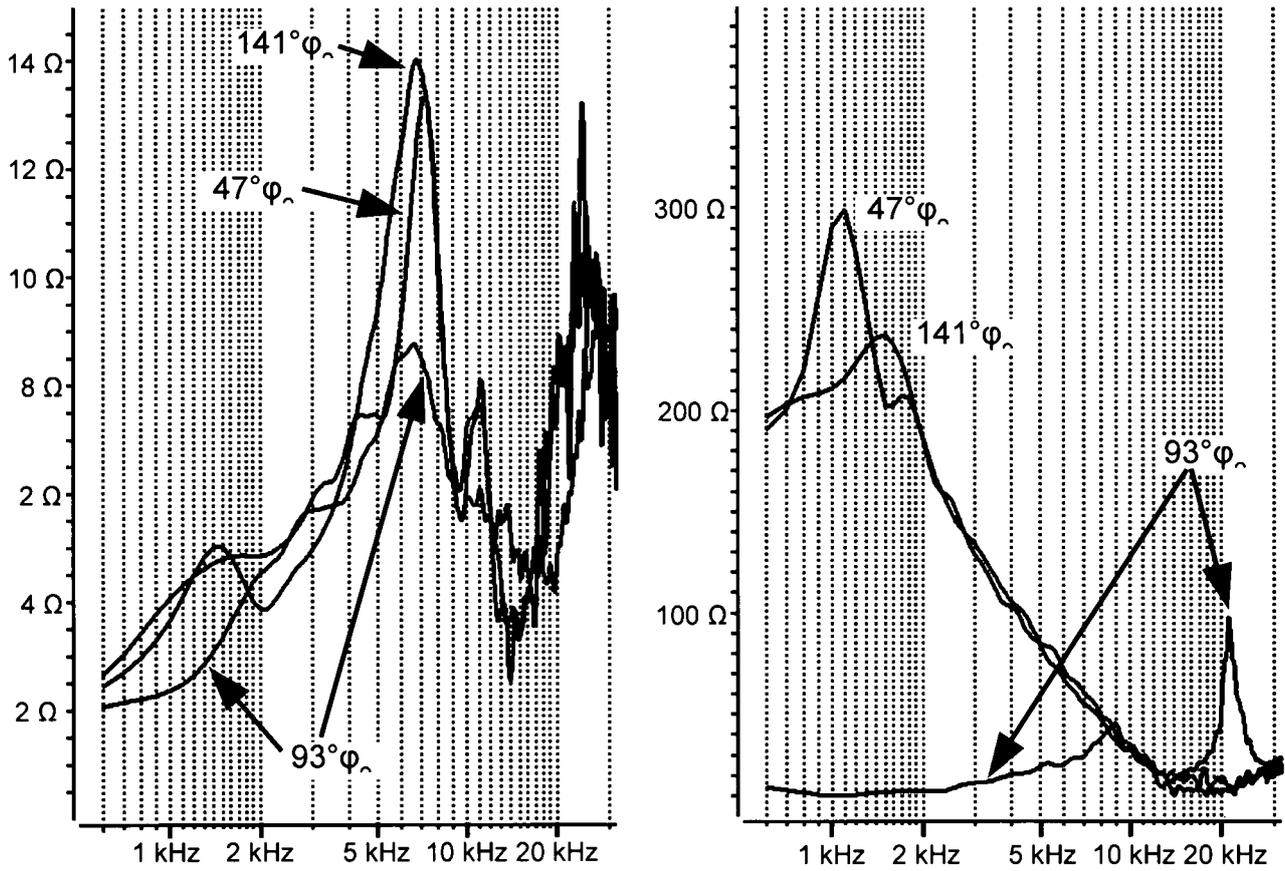


Fig. 8