



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0621703-6 B1

(22) Data do Depósito: 07/06/2006

(45) Data de Concessão: 19/12/2017



(54) Título: MÉTODO PARA DETERMINAR A RESPOSTA ELÉTRICA LINEAR DE UM TRANSFORMADOR, GERADOR OU MOTOR ELÉTRICO

(51) Int.Cl.: G01R 31/28; G01R 31/34; G01R 27/28; G01R 31/06

(73) Titular(es): ABB TECHNOLOGY AG

(72) Inventor(es): MARTIN TIBERG; CHRISTOPH HEITZ; OLAF HOENECKER; BJORN GUSTAVSEN

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA DETERMINAR UMA RESPOSTA ELÉTRICA LINEAR DE UM COMPONENTE SOB PELO MENOS UMA CONFIGURAÇÃO DE TESTE DE TERMINAL E USO DO MÉTODO"**.

Campo Técnico

[001] A invenção diz respeito a um método para determinar a resposta elétrica linear de um transformador, gerador ou motor elétrico, bem como a um uso de tal método.

Antecedentes

[002] Existem vários métodos para caracterizar a resposta elétrica linear de transformadores, geradores ou motores elétricos. Tipicamente, eles incluem uma etapa de medição sob uma certa configuração do terminal, onde os terminais do componente são conectados com fontes ou impedâncias definidas de tensão elétrica ou de corrente, ou interconectados uns com os outros. Alguns terminais também podem ser deixados não conectados (isto é, conectados com uma impedância de valor infinito). Então, uma medição é realizada, por exemplo, pela determinação da tensão elétrica em um terminal em função da tensão elétrica em outro terminal.

[003] Uma tal técnica típica é a Análise de Resposta de Frequência (FRA), a qual se desenvolveu como uma técnica de diagnóstico de transformador em relação ao controle de qualidade e para detecção de falhas internas, as quais de outro modo não podem ser detectadas sem abrir o transformador e inspecionar o mesmo manualmente e pela observação. Abrir um transformador e esvaziar o óleo no mesmo é muito oneroso, e leva muito tempo, ao passo que a FRA é relativamente barata e feita em menos do que um dia.

[004] A medição FRA consiste da aplicação de uma tensão elétrica em um terminal do transformador (o terminal da fonte) e da medição da saída de tensão elétrica em um dos outros (o terminal de ab-

sorção de dados) em relação a uma grande faixa de frequências. Os outros terminais, os quais não são o fonte ou o de absorção de dados, podem ser aterrados ou deixados abertos.

[005] O diagnóstico é realizado pelo estudo de como a proporção de tensão elétrica entre a absorção de dados e a fonte varia através da faixa de frequências, e pela comparação destas variações entre as fases para verificar assimetrias e / ou para comparar estas variações com registros antigos dos mesmos transformadores ou de transformadores similares para verificar as alterações através do tempo. Não existe padrão especificando exatamente como as medições FRA devem ser feitas, mesmo que no entanto grupos tanto dentro do IEEE como do CIGRE trabalhem em tal padronização. Tipicamente, a proporção de tensão elétrica e algumas vezes a fase entre um terminal fonte e de absorção de dados, é medida. O número de configurações possíveis de terminal é muito grande, devido às variações nos seguintes parâmetros:

- Tipo de transformador,
- Número de terminais no transformador,
- Ter os terminais não utilizados abertos ou aterrados.

[006] Um típico transformador de dois enrolamentos triângulo – estrela ou estrela - triângulo possui sete terminais: 3 no lado HV, 3 no lado LV e um ponto neutro. Cada um destes sete terminais pode ser o terminal fonte e qualquer um dos outros 6 pode ser o terminal de absorção de dados, resultando em 42 combinações diferentes e medições possíveis. Tendo os terminais não utilizados, tanto abertos como aterrados, dobra-se o número de medições. Terminais extras ou configurações especiais, tal como possuindo alguns terminais abertos e alguns fechados, multiplicam o número de medições adicionais.

[007] Este grande número de configurações possíveis de terminais torna uma caracterização completa do componente excessiva-

mente trabalhosa, se não impossível, pela FRA padrão. Portanto, tipicamente, somente um subconjunto de configurações possíveis de terminais é medido, por exemplo:

- 3 no lado triângulo; conecta quaisquer dois terminais para medir através de cada enrolamento,
- 3 no lado estrela; mede entre neutro e cada terminal,
- 3 entre o lado HV e o lado LV para cada fase.

[008] Estas nove medições frequentemente fornecem uma boa imagem das condições do enrolamento, de modo que pode ser feita uma avaliação da condição do transformador. Entretanto, existem várias desvantagens importantes deste tipo de medição:

1. Ainda leva uma quantidade de tempo significativo para novamente conectar nove vezes.

2. Acontece facilmente que erros de medição acontecem quando novamente fazendo a conexão. A resistência do contato pode variar muito dependendo de o quanto bem conectados estão os cabos de medição com os terminais do transformador. Alterar a posição dos cabos entre duas conexões novamente realizadas, pode de forma significativa afetar a resposta da medição na faixa de alta frequência.

3. A medição é incompleta. Apenas a partir das medições LV-HV por cada fase, você não vê o acoplamento entre as fases, o qual pode revelar informação importante.

4. O equipamento de medição FRA mais comercial possui impedância de 50 Ohm, tanto no canal fonte como no canal de absorção de dados, a qual é adicionada em série para a medição do transformador e suprime a resposta para as baixas impedâncias. Assim, as variações de impedância entre, digamos, 1 até 3 Ohm, dificilmente pode ser vista devido à impedância de 50 Ohm em série.

5. Cada uma das 9 medições executadas em um estado diferente do transformador. Por consequência, os terminais são alter-

nativamente abertos ou terminados com 50 Ohm, o que completamente altera o estado do transformador. Mesmo se todos os terminais não medidos estiverem aterrados, a terminação ainda é alterada do terra para 50 Ohm em alguns terminais entre cada medição, o que invalida a análise e a modelagem avançada que assume que o transformador é um sistema constante bem definido.

Estado da Técnica Adicional

[009] A partir da US 4.156.842, um sistema para medir as imitâncias, impedâncias e admitâncias de transferência de uma rede elétrica linear possuindo uma ou mais portas, é conhecido. O sistema utiliza núcleos ferromagnéticos presos por cima ("clamp-on") para eletromagneticamente acoplar o sistema de medição de imitância de transferência com a rede elétrica sem ter que interromper a operação on-line normal da rede elétrica.

[0010] A GB 2 411 733 descreve um método para caracterizar um transformador trifásico utilizando uma única fonte de alimentação de fase.

[0011] O IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, Setembro, 1994, página 593ff, revela um procedimento direto de estimativa de probabilidade máxima para identificar os modelos assíncronos de máquina baseado nos dados de teste de resposta de frequência estando em repouso.

Sumário da Invenção

[0012] Por consequência, é um objetivo proporcionar um método que permita determinar a resposta linear de um transformador, gerador ou motor elétrico possuindo vários terminais, isto é, pelo menos dois terminais, em particular pelo menos três terminais, sob uma dada configuração de teste do terminal. O método deve ter a facilidade de uso e / ou confiabilidade aperfeiçoada.

[0013] Este objetivo é alcançado pelo método de acordo com a

reivindicação 1.

[0014] Por consequência, em uma primeira etapa a), um conjunto de configurações de terminais é aplicado junto aos terminais do componente, de modo a obter dados descrevendo a resposta elétrica linear do componente para qualquer padrão de tensões elétricas ou de correntes aplicado junto aos terminais. Tais dados, por exemplo, são expressos em termos de uma matriz de admitância ou de impedância, ou, de forma vantajosa, por um conjunto de pares de vetores de corrente e de tensão elétrica, como descrito abaixo.

[0015] Utilizando estes dados, a resposta elétrica linear do componente sob a configuração de teste do terminal pode agora ser calculada em uma segunda etapa b).

[0016] Este procedimento tem a vantagem de que nenhuma medição real sob a configuração de teste do terminal é requerida. Ao invés disso, a medição pode acontecer sob qualquer conjunto adequado de configurações do terminal, o que permite escolher o processo de medição disponível mais adequado.

[0017] De forma vantajosa, os mesmos dados podem ser utilizados para calcular a resposta do componente para várias configurações de teste diferentes.

[0018] Em uma concretização vantajosa adicional, um dispositivo de medição é conectado simultaneamente com todos os terminais do componente. O dispositivo de medição é adaptado para gerar o conjunto de configurações de terminal e para medir a resposta do componente a cada uma destas configurações de terminal. Por exemplo, o dispositivo de medição pode ser equipado para aplicar diferentes valores de tensões elétricas, de correntes e / ou de impedâncias para cada terminal. Isto permite gerar o conjunto de configurações de terminal sem a necessidade de alterar os cabos ligados com o componente, o que aumenta a precisão da medição.

[0019] Em particular, tal dispositivo de medição pode ser operado automaticamente, o que permite aumentar a velocidade e a confiabilidade da medição.

[0020] De forma vantajosa, a resposta elétrica linear na configuração de teste do terminal é calculada como a proporção e / ou o deslocamento de fase entre duas tensões elétricas em diferentes terminais, em particular, em função da frequência. Este tipo de informação é utilizado na assim chamada análise de resposta de frequência (FRA), a qual é aplicada quando avaliando a condição ou envelhecimento de um transformador. O presente método permite realizar a FRA mesmo se nenhuma medição direta da proporção e / ou do deslocamento de fase entre duas tensões elétricas em diferentes terminais foi feita.

[0021] Uma implementação particularmente vantajosa da etapa a) compreende um "procedimento de estimativa", no qual uma matriz de admitância estimada Y' é determinada pela aplicação de tensões elétricas junto aos terminais do componente, e pela medição da resposta do componente. O procedimento de estimativa, por exemplo, pode consistir de uma medição convencional da matriz de admitância Y' pela aplicação de uma tensão elétrica junto a um terminal, do aterramento de todos os outros terminais, da medição da corrente em cada terminal, e da repetição deste procedimento para todos os terminais. O procedimento de estimativa é seguido por um "procedimento de medição", no qual vários padrões de tensão elétrica u_k são aplicados junto aos terminais. Os padrões de tensão elétrica correspondem aos vetores característicos v_k da matriz de admitância estimada Y' , onde "correspondem" é para expressar que o padrão u_k é substancialmente (mas não necessariamente exatamente) paralelo ao vetor característico v_k (normalizado), correspondendo a cada autovalor λ_k . Para cada padrão de tensão elétrica aplicado u_k , a resposta do componente é medida.

[0022] Como foi observado, a aplicação de padrões de tensão elétrica u_k correspondendo aos vetores característicos v_k da matriz de admitância Y' permite obter uma descrição mais precisa do componente, especialmente quando os autovalores λ_k da matriz de admitância Y' diferem substancialmente uns dos outros.

[0023] A invenção é particularmente útil para componentes de alta tensão elétrica ou de tensão elétrica média, isto é, para componentes adequados para operação em tensões elétricas excedendo a 1 kV.

[0024] O método pode, por exemplo, ser utilizado para caracterizar o componente elétrico. De modo a fazer isto, pode ser proporcionada uma referência, por exemplo, medida em um momento anterior (antes da etapa a) ou medida em um componente de referência, referência esta que descreve a resposta ("primeira resposta") do componente sob uma dada configuração de teste de terminal. Uma medição de acordo com o presente método é então realizada para determinar o estado real do componente, e os dados a partir desta medição são utilizados para calcular uma "segunda resposta" do componente sob a configuração de teste do terminal. A primeira e a segunda resposta são então comparadas para a verificação da condição real do componente.

Breve Descrição dos Desenhos

[0025] Concretizações, vantagens e aplicações adicionais da invenção são reveladas nas reivindicações dependentes, bem como na descrição seguinte, a qual faz referência às figuras, onde:

[0026] A figura 1 é um exemplo de um transformador a ser caracterizado pelo presente método,

[0027] A figura 2 apresenta o componente da figura 1 conectado com um dispositivo de medição,

[0028] A figura 3 é uma ilustração esquemática de um componente a ser caracterizado,

[0029] A figura 4 é um diagrama de blocos de circuito de uma pri-

meira concretização de um dispositivo para um dispositivo de medição para caracterizar o componente,

[0030] A figura 5 é uma segunda concretização de um dispositivo de medição, e

[0031] A figura 6 é uma terceira concretização de um dispositivo de medição.

Concretizações da Invenção

1. Definições:

[0032] O termo "configuração do terminal" se refere a um estado definido de todos os terminais do componente. O estado de um terminal k pode ser definido pela

- corrente i_k que está fluindo através do mesmo ($i_k = 0$ corresponde a um terminal aberto) ou

- tensão elétrica u_k que é aplicada para o mesmo ($u_k = 0$ corresponde a um terminal aterrado) ou

- a impedância Z_k e tensão elétrica φ_k de uma fonte de tensão elétrica que está conectada em série com o mesmo, ou

- índice m de outro terminal que com o qual o dado terminal k está conectado (ou uma série de índices m_1, m_2, \dots , se o terminal k estiver conectado com vários outros terminais).

2. Primeiro exemplo:

[0033] Para ilustrar a presente invenção, um exemplo da mesma é descrito no dito a seguir. Este exemplo relaciona-se com a caracterização e, em particular, com o controle de qualidade de um transformador 1 como ele é, por exemplo, apresentado na figura 1.

[0034] O transformador 1 da figura 1 é da configuração estrela - triângulo e possui $n = 7$ terminais $L1, L2, L3, N, H1, H2, H3$.

[0035] Para caracterizar o transformador 1, um procedimento com duas etapas é realizado, a saber, uma etapa de medição a) e uma etapa de cálculo b).

[0036] Na etapa de medição a), todos os sete terminais L1, L2, L3, N, H1, H2, H3 do transformador 1 estão conectados com um dispositivo de medição 2 como apresentado na figura 2. O dispositivo de medição 2 compreende, para cada terminal L1, L2, L3, N, H1, H2, H3, uma fonte de tensão elétrica ajustável e / ou uma fonte de corrente ajustável e / ou uma impedância ajustável. O dispositivo de medição 2 automaticamente aplica um conjunto de configurações de terminal para o transformador 1 por repetidamente ajustar as fontes de tensão elétrica, as fontes de corrente e / ou as impedâncias. Para cada configuração de terminal, a resposta do transformador 1 é medida, por exemplo, pela medição das tensões elétricas e das correntes em todos os terminais L1, L2, L3, N, H1, H2, H3. Em uma concretização mais simples, n diferentes configurações de terminal são aplicadas, por exemplo, pela aplicação de n diferentes vetores de tensão elétrica linearmente independentes u_i ($i = 1 \dots n$) e pela medição dos vetores de corrente correspondentes i_i ($i = 1 \dots n$). Cada vetor de tensão elétrica u_i possui n elementos (u_{1i}, \dots, u_{ni}), e cada vetor de corrente i_i possui n elementos (i_{1i}, \dots, i_{ni}) indicando a tensão elétrica u_{ki} e a corrente i_{ki} no terminal k, na configuração de terminal i. O conhecimento dos vetores u_i e i_i para as n configurações de terminal permite estimar a matriz de admitância Y a partir de um conjunto de n equações de vetor

$$i_i = Y \cdot u_i \quad (1)$$

[0037] As medições são realizadas em função da frequência.

[0038] No entanto, deve ser observado que este tipo de medição produz somente resultados imprecisos, e um método de medição mais refinado é descrito na seção "método de medição aperfeiçoado" abaixo.

[0039] Em geral, o resultado da etapa de medição a) são dados descrevendo a resposta elétrica linear do componente 1 (tal como o

transformador 1) para qualquer padrão de tensões elétricas ou de correntes aplicadas junto aos terminais L1, L2, L3, N, H1, H2, H3. Estes dados podem, por exemplo, serem expressos pela matriz de admitância Y , pela matriz de impedância correspondente Z , ou por n pares de vetores independentes de corrente e de tensão elétrica, cada par descrevendo as tensões elétricas e as correntes correspondentes em todos os terminais L1, L2, L3, N, H1, H2, H3. Por razões explicadas na seção "método de medição aperfeiçoado" abaixo, os n pares de vetores linearmente independentes de corrente e de tensão elétrica são considerados como sendo a representação mais vantajosa dos dados.

[0040] Na etapa de cálculo b) seguindo a etapa de medição a), a resposta elétrica linear do transformador 1 é calculada para uma dada configuração de teste de terminal. Em geral, esta configuração de teste de terminal não estará entre o conjunto de configurações de terminal utilizado na etapa a) para medir o componente.

[0041] Por exemplo, quando a FRA é para ser realizada no transformador 1, a configuração de teste será uma configuração onde todos, exceto dois terminais, estão aterrados (ou abertos). Os dois terminais são assumidos como estando terminados por impedâncias conhecidas, tal como 50 Ohm. Uma tensão elétrica é aplicada junto a um dos dois terminais, enquanto a voltagem no outro terminal é medida. Em outras palavras, a configuração de teste de terminal corresponde a uma configuração típica de terminal de medição FRA. Entretanto, ao invés de realizar uma medição real na configuração de teste de terminal, o resultado de tal medição é simulado pelo cálculo do comportamento do componente a partir dos dados obtidos na etapa a).

[0042] O resultado calculado então pode, por exemplo, ser utilizado para determinar a proporção e / ou a diferença de fase de tensão elétrica entre dois terminais em função da frequência para obter um gráfico como utilizado na FRA.

[0043] Por exemplo, para calcular a resposta de uma medição FRA, onde o primeiro terminal (por exemplo, L1 na figura 1) é a fonte, o quarto terminal (por exemplo, H1 na figura 1) é o de absorção de dados, e todos os outros terminais L2, L3, N, H2, H3, estão abertos, e o primeiro e o quarto terminal são terminados com uma $R_1 = R_4 =$ impedância de 50 Ohm, o vetor de corrente i é dado por

$$i = \begin{pmatrix} i_1 \\ 0 \\ 0 \\ -u_4 / R_4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

[0044] A resposta FRA u_4 / u_1 é direta para calcular a partir da relação

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ 0 \\ 0 \\ -u_4 / R_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{21} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & Y_{77} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ \dots \\ \dots \\ u_4 \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix}, \quad (3)$$

[0045] com y_{ij} sendo componentes da matriz de admitância Y .

[0046] o modo mais fácil de continuar é multiplicar ambos lados da equação (3) pela matriz de impedância $Z = Y^{-1}$ e então reduzir o sistema de equações para apenas a primeira e a quarta fileira. Então, existem três incógnitas, u_1 , u_4 e i_1 , e duas equações. Desde que estamos interessados na proporção complexa u_4 / u_1 (isto é, a proporção das amplitudes de tensão elétrica bem como seu deslocamento de fase mútuo), as incógnitas são adicionalmente reduzidas para duas, e obtemos o seguinte resultado:

$$\frac{u_4}{u_1} = \frac{R_4 \cdot z_{41}}{z_{11}(z_{44} + R_4) - z_{41}z_{14}}, \quad (4)$$

[0047] onde z_{ij} sendo os componentes da matriz de impedância Z .

[0048] Se a mesma FRA com os terminais não utilizados L2, L3, N, H2, H3 sendo aterrados ao invés de estarem abertos forem para serem calculados, suas configurações de terminal apenas se alterariam $i_x = 0$ para $u_x = 0$, produzindo a expressão

$$\frac{u_4}{u_1} = - \frac{R_4 \cdot Y_{41}}{1 + R_4 \cdot Y_{44}} \quad (5)$$

[0049] Uma vez que os dados são obtidos na etapa a), a resposta do componente 1 sob qualquer configuração de teste pode ser calculada. Em particular, a resposta do componente 1 sob configurações de teste severas (por exemplo, sob as nove configurações tipicamente utilizadas para a FRA) pode ser calculada facilmente e rapidamente.

3. Aplicações gerais:

[0050] Na primeira concretização acima, a aplicação do presente método para medições FRA em um transformador 1 possuindo sete terminais L1, L2, L3, N, H1, H2, H3 foi descrita. Entretanto, deve ser observado que o método pode ser utilizado para várias outras aplicações. Em particular:

[0051] Ao invés de utilizar o método em um transformador 1, o componente 1 sob teste também pode ser um gerador elétrico e / ou um motor elétrico.

[0052] Em geral, o número n de terminais p_1, \dots, p_n (figura 3, 4) do componente 1 pode variar, e, por exemplo, ser três (por exemplo, para o motor trifásico na configuração triângulo) ou quatro (por exemplo, para um gerador trifásico na configuração estrela ou para um trans-

formador de fase). O presente método em particular é útil para componentes 1 com mais do que dois terminais p_1, \dots, p_n , onde existe um número potencialmente de diferentes configurações de terminal.

[0053] O presente método pode ser utilizado para vários propósitos. Uma aplicação típica é controle de qualidade, por exemplo, por utilizar a FRA como descrito acima, ou por simular outras medições utilizando os dados obtidos na etapa de medição a). Outra aplicação é a modelagem de rede: alguns modelos de rede exigem a medição da resposta linear de um componente 1 sob certas dadas configurações de terminal – o presente método pode aliviar a necessidade de realmente realizar estas medições pela utilização dos dados a partir da etapa de medição a) de modo a calcular a resposta sob as dadas configurações de terminal.

4. Método de medição aperfeiçoado:

[0054] Esta seção descreve um método aperfeiçoado para obter os dados na etapa de medição a).

[0055] A figura 3 apresenta um componente com vários terminais 1 possuindo $n > 1$ terminais p_1 até p_n , os quais podem ser um transformador, um motor elétrico ou um gerador. Quando as tensões elétricas lineares u_1 até u_n são aplicadas junto aos terminais p_1 até p_n , as correntes i_1 até i_n irão fluir. A resposta elétrica linear do componente 1 é caracterizada por sua matriz de admitância Y ou, de forma equivalente, por sua matriz de impedância Z . Na notação de admitância, aplicar o vetor de tensão elétrica $u = (u_1 \dots u_n)$ das tensões elétricas nos terminais p_1 até p_n gera um vetor de corrente $i = (i_1 \dots i_n)$ como a seguir:

$$i = Y \cdot u. \quad (11)$$

[0056] O princípio geral do método de medição aperfeiçoado é baseado em um procedimento de estimativa e em um procedimento de medição. No procedimento de estimativa, uma matriz de admitância estimada Y' é determinada, no procedimento de medição, uma medi-

ção mais precisa é realizada.

[0057] No procedimento de estimativa, os elementos da matriz de admitância estimada Y' podem, por exemplo, serem medidos diretamente utilizando métodos convencionais. Os elementos diagonais Y'_{ii} podem, por exemplo, serem medidos pela aplicação de uma tensão elétrica u_i junto ao terminal p_i e pela medição da corrente i_i no mesmo terminal p_i enquanto todos os outros terminais são curto-circuitados para zero volts, isto é, $Y'_{ii} = i_i / u_i$ enquanto $u_j = 0$ para $i \neq j$. Os outros elementos Y'_{ij} da matriz podem ser medidos pela aplicação de uma tensão elétrica u_i no terminal p_i enquanto estabelecendo todos os outros terminais para zero volt e pela medição da corrente i_j no terminal p_j , $Y'_{ij} = i_j / u_i$ enquanto $u_j = 0$ para $i \neq j$.

[0058] Outros métodos convencionais para medir a matriz de impedância estimada Y' no procedimento de estimativa podem igualmente ser utilizados.

[0059] Em geral, a matriz de admitância estimada Y' possui n autovalores $\lambda_1 \dots \lambda_n$ e n correspondendo aos vetores característicos (normalizados) $v_1 \dots v_n$ para os quais

$$Y' \cdot v_k = \lambda_k \cdot v_k. \quad (12)$$

[0060] Uma vez que a matriz de admitância é estimada Y' seja conhecida, seus vetores característicos v_k podem ser calculados.

[0061] Em um procedimento de medição seguindo ao procedimento de estimativa, vários (em geral, n) padrões de tensão elétrica $u_k = (u_{1k} \dots u_{nk})$ são aplicados junto aos terminais p_1, \dots, p_n do componente 1. Cada padrão de tensão elétrica u_k corresponde a um dos vetores característicos v_k . Para cada padrão de tensão elétrica aplicado u_k , uma resposta do componente 1 é medida, em particular, pela medição do padrão de corrente induzido i_k .

[0062] Como mencionado acima, um padrão de tensão elétrica u_k

corresponde ao vetor característico (normalizado) v_k (o qual é um dos n vetores característicos normalizados da matriz de admitância), a saber, no sentido de que o padrão de tensão elétrica u_k é substancialmente paralelo ao vetor característico v_k correspondendo ao autovalor λ_k . Teoricamente, utilizar $u_k \propto v_k$ seria a melhor solução, mas um dispositivo de medição 2, 3, gerando os padrões de tensão elétrica u_k , em geral, não estarão aptos a gerar padrões de tensão elétrica combinando com os vetores característicos v_k exatamente devido aos erros de discretização. Métodos para manipular os dispositivos 2, 3, com resolução limitada para gerar os padrões de tensão elétrica, serão endereçados abaixo.

[0063] Uma vez que o procedimento de medição esteja completo, os padrões de tensão elétrica u_k e os padrões de corrente correspondentes i_k , isto é, um conjunto de n pares de vetores de tensão elétrica e de corrente u_k, i_k , totalmente caracteriza a resposta linear do componente 1.

[0064] Em geral, a matriz de admitância Y é dependente da frequência. Por consequência, em várias aplicações, a resposta elétrica linear do componente 1 deve ser conhecida para uma faixa de frequência estendida, por exemplo, de 50 Hz até mais do que 500 kHz. Por esta razão, o procedimento de estimativa é realizado em várias frequências ω_i na dada faixa de frequências.

[0065] De forma vantajosa, para cada procedimento de estimativa, os autovalores $\lambda_k(\omega_i)$ na dada frequência ω_i são calculados. Então, as frequências mais críticas são determinadas, as quais são estas frequências onde os autovalores $\lambda_k(\omega_i)$ alcançam um máximo local ou mínimo, ou, em particular, onde a proporção absoluta entre o autovalor maior e menor possui um máximo ou excede a um dado limite. Estas frequências críticas são de interesse particular, porque elas são indicativas de uma ressonância do componente 1 ou porque elas apresen-

tam que alguns dos autovalores estimados podem ser de pouca precisão e o procedimento de medições descrito é requerido para aumentar a precisão.

[0066] É principalmente possível dividir a faixa de frequência desejada em uma série de janelas de frequência e calcular as frequências mais críticas em cada janela de frequência.

[0067] Para cada uma ou pelo menos para algumas das frequências críticas, o procedimento de medição descrito acima é realizado para refinar a medição. Em adição, ou alternativamente a isto, o procedimento de medição pode ser realizado em outros pontos dentro da faixa de frequência de interesse.

[0068] As frequências ω_i onde as medições são realizadas podem ser distribuídas linearmente ou de forma logarítmica através da faixa de frequência de interesse. Em uma concretização vantajosa, entretanto, a densidade das frequências de medição ω_i próximas das frequências críticas como mencionadas acima é maior do que a densidade das frequências de medição ω_i nas regiões espectrais longe das frequências críticas. Isto permite obter uma caracterização mais confiável do componente 1.

4.1 Dispositivo de medição:

[0069] Um dispositivo de medição geral 2, 3 para realizar o método de medição aperfeiçoado é revelado na figura 4. Em um caso mais geral, o dispositivo de medição 2, 3 compreende n fontes de tensão elétrica ajustáveis gerando as tensões elétricas φ_1 até φ_n , as quais são alimentadas para os terminais p_1 até p_n através das impedâncias z_1 até z_n . Todas as tensões elétricas φ_i até φ_n possuem frequência igual e relação de fase conhecida. As impedâncias Z_1 até Z_n podem ser praticamente zero ou, como descrito abaixo, elas podem ser ajustáveis e potencialmente não zero. Uma unidade de controle 3 é proporcionada para automaticamente ajustar as fontes de tensão elétrica e, onde

aplicável, as impedâncias Z_1 até Z_n .

[0070] Para o dispositivo da figura 4, temos

$$\varphi = \mathbf{u} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{i}, \quad (13)$$

[0071] onde $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ são as tensões elétricas das fontes de tensão elétrica, $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$ as tensões elétricas de entrada nos terminais p_1 até p_n , e \mathbf{D} é uma matriz diagonal com os elementos diagonais Z_1 até Z_n .

[0072] Combinar as equações (11) e (13) fornece a seguinte relação entre as tensões elétricas de entrada \mathbf{u} e as tensões elétricas aplicadas φ :

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{Y})^{-1} \cdot \varphi. \quad (14)$$

[0073] onde \mathbf{I} é a matriz de identidade $n \times n$.

[0074] Como mencionado acima, as tensões elétricas aplicadas \mathbf{u} devem corresponder aos autovalores v_k da matriz de admitância estimada \mathbf{Y}' . Entretanto, em geral, não será possível associar esta condição exatamente, porque as fontes de tensão elétrica não estarão aptas a gerar quaisquer valores de tensão elétrica arbitrários, mas somente um conjunto separado de valores. Seu número de valores de tensão elétrica que pode ser gerado for pequeno, as impedâncias Z_1 até Z_n podem ser projetadas para serem ajustáveis, bem como de modo a obter um número maior de tensões elétricas de entrada diferentes \mathbf{u} .

[0075] O vetor de tensão elétrica de entrada \mathbf{u}_k pode ser expresso como uma combinação linear dos autovalores v_i , isto é,

$$\mathbf{u}_k = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{v}_i. \quad (15)$$

[0076] com os coeficientes α_i . Combinar as equações (15), (11) e (12) produz

$$\mathbf{i} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \alpha_i \mathbf{v}_i . \quad (5)$$

[0077] Por consequência, de modo a maximizar a influência do k -ésimo autovalor λ_k sobre o vetor de corrente de entrada \mathbf{i} na proporção para outros autovalores, a seguinte função de erro deve ser minimizada.

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i \alpha_i)^2 - (\lambda_k \alpha_k)^2}{(\lambda_k \alpha_k)^2} . \quad (16)$$

[0078] Em outras palavras, para cada autovalor λ_k , os coeficientes α_1 até α_n devem ser encontrados (entre o conjunto de coeficientes possíveis, o qual é um conjunto finito de vidro a discretização inerente ao dispositivo de medição 2) para os quais o termo da equação (16) é menor.

[0079] Se dispositivo de medição 2 possuir fontes de tensão elétrica ajustáveis e impedâncias como apresentadas na figura 5, temos

$$\alpha = [\mathbf{v}_1 \quad \dots \quad \mathbf{v}_n]^{-1} \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{Y})^{-1} \cdot \phi \quad (17)$$

[0080] Um dispositivo de medição 2, 3 para realizar o método acima em geral deve compreender n geradores de tensão elétrica 10 que são programáveis para aplicar o padrão de tensão elétrica u junto aos n terminais do componente 1 sob teste. Adicionalmente, ele deve compreender n sensores de corrente 11 para medir as correntes i . Ele deve ser adaptado para aplicar pelo menos n padrões de tensão elétrica adequados u junto aos terminais p_1 até p_n consecutivamente para medir a resposta linear do componente 1 automaticamente. Isto é especialmente vantajoso para componentes 1 possuindo mais do que dois terminais p_1 até p_n , porque utilizar este tipo de medição automática nos componentes 1 com $n > 2$ terminais p_1 até p_n proporciona ganhos substanciais na velocidade e na precisão, enquanto reduzindo os

custos.

[0081] De forma vantajosa, o dispositivo de medição 2, 3 deve compreender uma unidade de controle 3 para realizar a medição utilizando os procedimentos de estimativa e de medição esboçados acima.

[0082] Uma concretização possível de um dispositivo de medição 2, 3 é apresentada na figura 5. Neste dispositivo 2, 3 é apresentada na figura 5. Neste dispositivo 2, 3, um gerador de tensão elétrica 10 para gerar uma tensão elétrica individual φ_i de amplitude e fase ajustáveis é proporcionado para cada terminal de entrada p_1 até p_n . Ele também compreende n sensores de corrente 11, uma para medir a corrente para / a partir de cada terminal p_1 até p_n . A unidade de controle 3 está apta a estabelecer a tensão elétrica de entrada aplicada u diretamente por controlar os geradores de tensão elétrica 10. Se o número de valores de tensão elétrica que pode ser gerado por cada gerador de tensão elétrica 10 for pequeno, uma tensão elétrica ideal para um dado vetor característico v_k pode ser calculada por se minimizar o erro da equação (16). Para cada padrão de tensão elétrica aplicado u_k , a unidade de controle 3 mede as correntes i através dos terminais p_1 até p_n por meio dos sensores de corrente 11.

[0083] Outra concretização possível de um dispositivo de medição é apresentada na figura 6. Este dispositivo compreende uma única fonte de tensão elétrica 4. A tensão elétrica φ a partir da fonte de tensão elétrica 4 é alimentada para n conversores de tensão elétrica 5 controlados pela unidade de controle 3, a fonte de tensão elétrica 4 e os conversores de tensão elétrica 5 sendo utilizados ao invés dos geradores de tensão elétrica 10 da concretização anterior. Cada conversor de tensão elétrica 5 seletivamente conecta um terminal p_1 até p_n com a tensão elétrica φ diretamente, com a tensão elétrica φ através de um conjunto de circuitos amortecedores 6, com o terra via uma impedân-

cia 7, com o terra diretamente, ou deixa o terminal p_1 até p_n aberto (impedância infinita). Este circuito de medição tem a vantagem de que ele requer uma única fonte de tensão elétrica 4. Configurações adequadas dos conversores de tensão elétrica para cada valor podem ser calculadas a partir das equações (16) e (17).

Processamento adicional dos resultados:

[0084] Como mencionado acima, o procedimento de medição aperfeiçoado descrito produz, para uma dada frequência, um conjunto de padrões de tensão elétrica u_k e os padrões de corrente correspondentes i_k , os quais caracterizam a resposta linear do componente 1 na dada frequência.

[0085] Os valores u_k e i_k para $k = 1$ até n podem, em princípio, serem convertidos para uma estimativa mais precisa da matriz de admitância Y ou da matriz de impedância correspondente Z . Entretanto, se os autovalores menor e maior da matriz de admitância Y forem diferentes por várias ordens de magnitude, tal matriz Y é difícil de processar numericamente com cálculos de ponto flutuante devido ao erros de arredondamento e à precisão limitada dos algoritmos numéricos. Por consequência, em uma concretização vantajosa da presente invenção, o par de vetores u_k e i_k é utilizado diretamente para processamento adicional, sem conversão para uma matriz de admitância Y ou matriz de impedância Z .

[0086] Por exemplo, os resultados do procedimento de medição podem, por exemplo, serem utilizados para a FRA como descrito acima ou para modelar as propriedades elétricas do componente 1 ou de uma rede da qual o componente 1 faz parte. Tal modelo pode, por exemplo, ser utilizado para analisar a estabilidade da rede em geral ou sua resposta para dados eventos em particular.

Lista de Números de Referência

1 componente sob teste

- 2 dispositivo de medição
- 3 unidade de controle, parte do dispositivo de medição
- 4 fonte única de tensão elétrica
- 5 conversor de tensão elétrica
- 6 circuito de amortecimento
- 7 impedância
- 10 gerador de tensão elétrica
- 11 sensor de corrente

REIVINDICAÇÕES

1. Método para determinar uma resposta elétrica linear de um componente (1) sob pelo menos uma configuração de teste de terminal,

onde o dito componente (1) é um transformador, gerador ou motor elétrico compreendendo vários terminais (p_1, \dots, p_n),

onde uma configuração de terminal se refere a um estado definido de todos os terminais do componente (1), e

onde o estado de um terminal (p_k) pode ser definido por,

uma corrente (i_k) que corre através dele ou,

uma tensão (u_k) que é aplicada a ele ou,

uma impedância (Z_k) e uma tensão (φ_k) de um fonte de tensão que são conectados em série com ele, ou

um índice (m) de outro terminal (p_m) ao qual o terminal (p_k) está conectado, ou

uma série de índices (m_1, m_2, \dots) se o terminal (p_k) estiver conectado a diversos outros terminais,

caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de,

etapa a) aplicar um conjunto de configurações de terminal para os ditos terminais (p_1, \dots, p_n) e obtendo como função da frequência dados descritivos da resposta elétrica linear do dito componente (1) para qualquer padrão de tensão elétrica ou de correntes aplicadas para os terminais (p_1, \dots, p_n), onde os ditos dados são descritivos da resposta elétrica linear do componente (1) ao longo de uma gama de frequência entre menos do que 100 Hz e mais do que 500 kHz, e onde o conjunto de configurações de terminal não compreende a configuração de teste de terminal, e

etapa b) calcular a resposta sob a configuração de teste do terminal a partir dos ditos dados.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado

pelo fato de que a etapa b) compreende o cálculo da resposta do componente (1) sob as várias diferentes configurações de teste de terminal.

3. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que a dita etapa a) compreende a etapa de simultaneamente conectar vários dos terminais (p_1, \dots, p_n), em particular, todos os terminais (p_1, \dots, p_n), do dito componente (1), com um dispositivo de medição (2, 3), o qual é adaptado para gerar o dito conjunto de configurações de terminal, e para medir a resposta do dito componente (1) às ditas configurações de terminal.

4. Método, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que o dito dispositivo de medição (2, 3) compreende, para cada terminal (p_1, \dots, p_n),

uma fonte de tensão elétrica ajustável (10; 5, 5), e / ou

uma fonte de corrente ajustável, e / ou

uma impedância ajustável (Z_1, \dots, Z_n),,

onde o dito conjunto de configurações de terminal é gerado pelo ajuste das ditas fontes de tensão elétrica (10; 4, 5), fontes de corrente e / ou impedâncias (Z_1, \dots, Z_n), respectivamente.

5. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 3 ou 4, caracterizado pelo fato de que as ditas fontes de tensão elétrica (10; 4, 5), fontes de corrente e / ou impedâncias (Z_1, \dots, Z_n) são ajustadas automaticamente sob o controle do dito dispositivo de medição (2, 3).

6. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que a dita etapa b) compreende a etapa de calcular uma proporção de tensão elétrica e / ou diferença de fase de tensão elétrica entre dois terminais diferentes (p_1, \dots, p_n).

7. Método, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado

pelo fato de que a dita etapa b) compreende a etapa de calcular uma proporção de voltagem e / ou diferença de fase de tensão elétrica entre dois terminais diferentes (p_1, \dots, p_n) em função da frequência.

8. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que o dito componente (1) possui mais do que dois terminais (p_1, \dots, p_n).

9. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que o dito componente (1) é um dispositivo (1) de alta tensão elétrica ou de média tensão elétrica.

10. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que os ditos dados compreendem um conjunto de N pares de vetores independentes de corrente e de tensão elétrica i_k, u_k , cada par descrevendo as tensões elétricas e as correntes correspondentes nos ditos terminais (p_1, \dots, p_n), onde N é o número de terminais (p_1, \dots, p_n) sendo medido do dito componente (1).

11. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que a dita etapa a) compreende:

um procedimento de estimativa compreendendo a etapa de determinar uma matriz de admitância estimada Y' do dito componente (1) pela aplicação de tensões elétricas para os ditos terminais (p_1, \dots, p_n) e pela medição de uma resposta do dito componente (1) e

um procedimento de medição compreendendo a etapa de aplicar vários padrões de tensão elétrica u_k para os terminais (p_1, \dots, p_n) do dito componente (1), cada padrão de tensão elétrica u_k correspondendo a um vetor característico v_k da dita matriz de admitância estimada Y' , e determinar, para cada padrão de tensão elétrica aplicado u_k , uma resposta do dito componente (1).

12. Método, de acordo com a reivindicação 11, caracteriza-

do pelo fato de que os ditos padrões de tensão elétrica u_k são gerados por meio de um dispositivo de medição (2, 3) capaz de aplicar um conjunto separado de diferentes padrões de tensão elétrica u_k para o dito terminal (p_1, \dots, p_n), onde cada padrão de tensão elétrica u_k corresponde a este membro do dito conjunto que possui a propriedade que o termo

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i \alpha_i)^2 - (\lambda_k \alpha_k)^2}{(\lambda_k \alpha_k)^2}$$

É mínimo, onde $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ são n autovalores da matriz de admitância estimada Y' e

$$\mathbf{u}_k = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{v}_i$$

Com coeficientes α_1 .

13. Uso do método como definido em qualquer uma das reivindicações precedentes, o dito componente (1) caracterizado pelas etapas de,

proporcionar uma referência descrevendo uma primeira resposta do dito componente (1) na dita configuração de teste do terminal,

utilizar a dita etapa a) para medir um estado real do dito componente (1), e

utilizar a dita etapa b) para calcular uma segunda resposta na dita configuração de teste do terminal, e

comparar a dita primeira e a dita segunda respostas.

14. Uso do método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que a dita referência foi derivada a partir de uma medição realizada antes da dita etapa a).

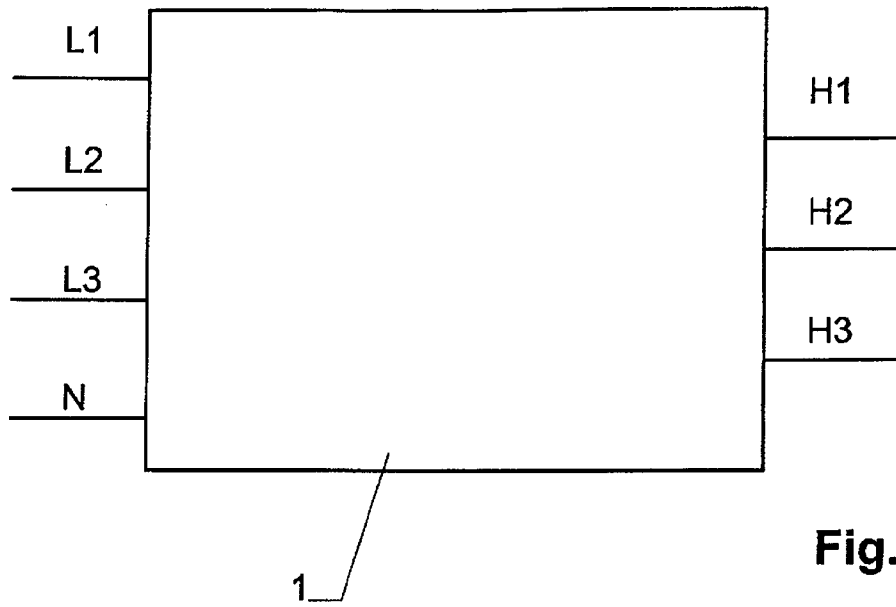


Fig. 1

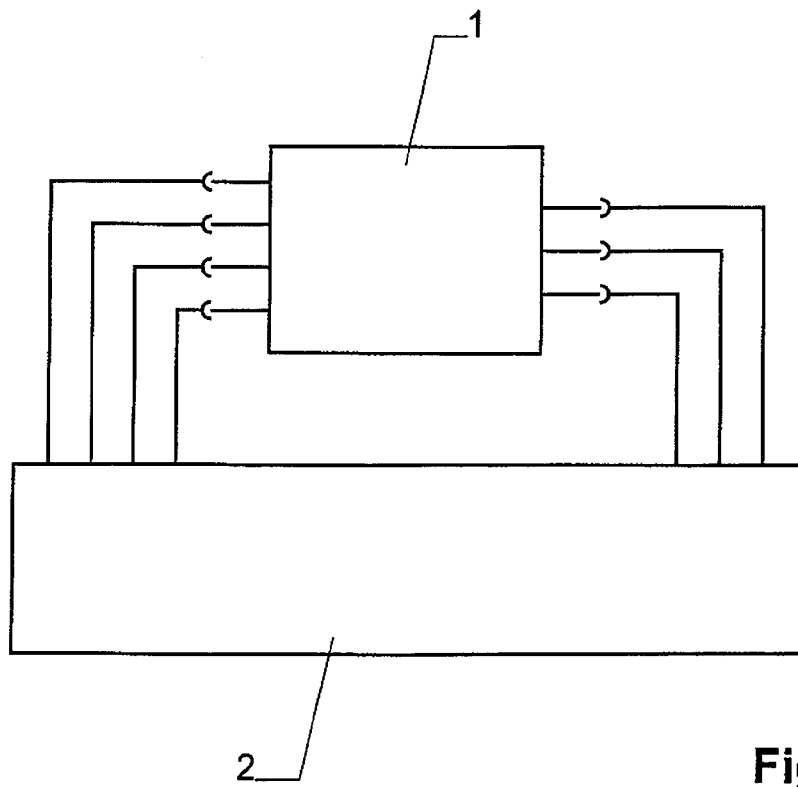


Fig. 2

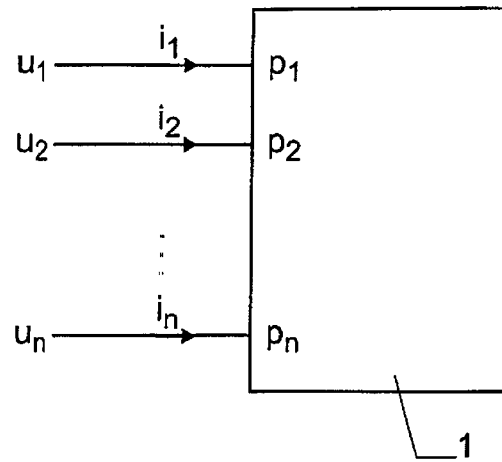


Fig. 3

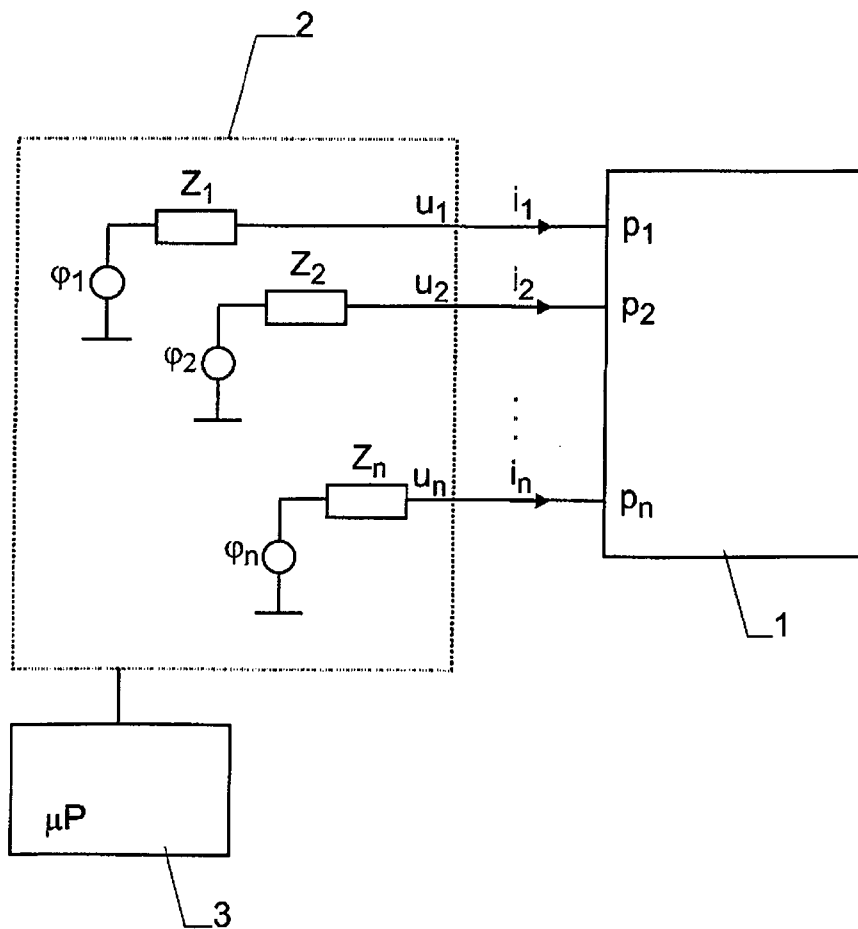


Fig. 4

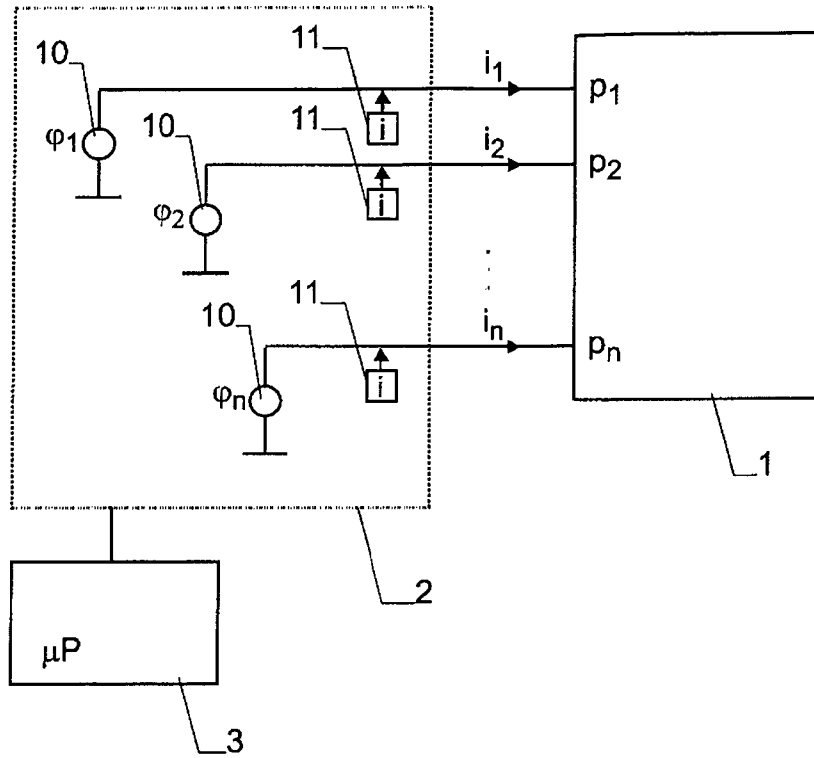


Fig. 5

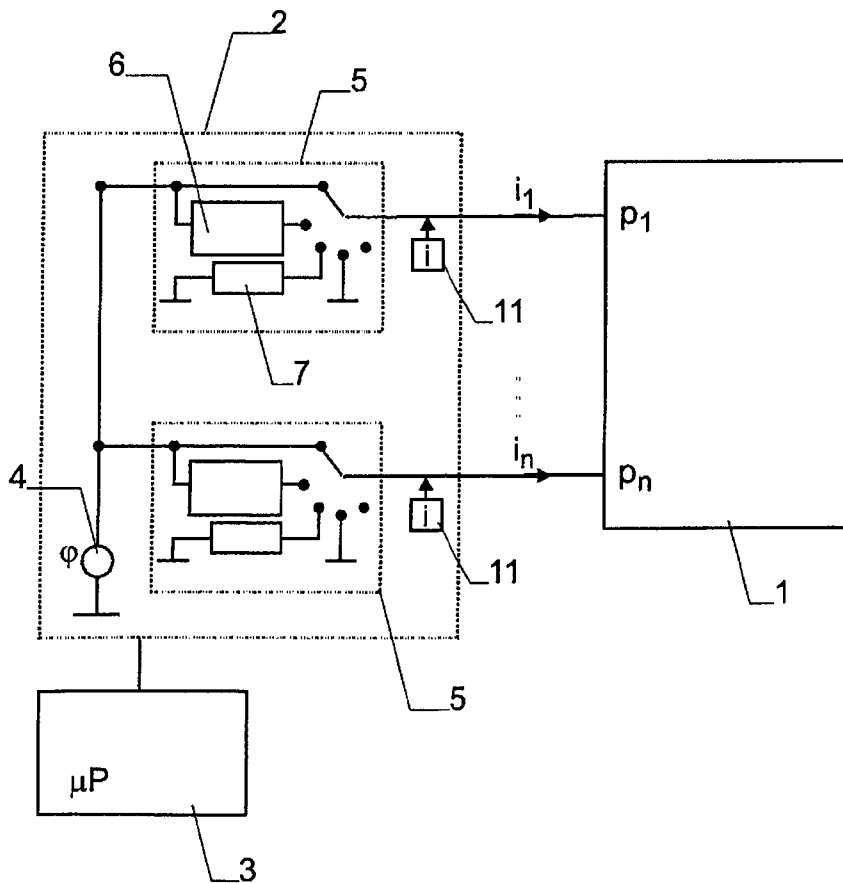


Fig. 6