
Instituto Politécnico do Porto
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Electrotécnica

Cursos de Engenharia

Transformador Eléctrico
Resposta em Frequência

Trabalho Laboratorial

Setembro de 2022

Baseado no original de José Puga, Judite Ferreira, 1999

Aviso de Segurança

Siga as instruções dadas pelo Professor presente no laboratório. Em caso de dúvida chame o Professor e elucide-se.

Não exceda a tensão indicada para a alimentação do transformador. Não tocar no circuito do lado da alta tensão do transformador.

Objectivos

Realizar a medição directa da indutância dos enrolamentos de um transformador eléctrico. Verificar experimentalmente a relação de transformação. Analisar o funcionamento do transformador para diferentes frequências.

Introdução

Exigências para a Transmissão de Energia

Para circuitos de corrente alternada, a taxa média de dissipação de energia numa carga resistiva é dada por:

$$P_{med} = I \cdot V$$

(Equ. 1)

Isto significa que, para uma dada exigência de potência, temos uma faixa de escolhas, desde uma corrente relativamente elevada e uma diferença de potencial relativamente baixa ou exactamente o inverso, desde que o produto $I \cdot V$ seja o exigido.

Em sistemas de distribuição de energia eléctrica é desejável por questões de segurança lidar com tensões relativamente baixas tanto na geração como na utilização. Por outro lado, na transmissão de energia eléctrica desde a central geradora até ao consumidor deseja-se ter a corrente mais baixa possível. Assim, a maior diferença de potencial vai reduzir as perdas ohmicas na linha de transmissão ($I^2 \cdot R$).

O Transformador Ideal

A incompatibilidade entre a exigência de transmissão em alta tensão e a necessidade de produção e consumo em baixa tensão leva à necessidade de elevar e reduzir a tensão eléctrica.

Por isso, é necessário um dispositivo para aumentar (para transmissão) e diminuir (para uso) a diferença de potencial num circuito mantendo a potência praticamente constante. Tal dispositivo é o **transformador** presente na figura 1.

O transformador ideal consiste em duas bobinas enroladas em torno de um núcleo ferromagnético do qual estão isoladas. O enrolamento primário, com N_p espiras, está ligado a um gerador de corrente alternada cuja f.e.m é dada por:

$$\xi = \xi_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{Equ. 2})$$

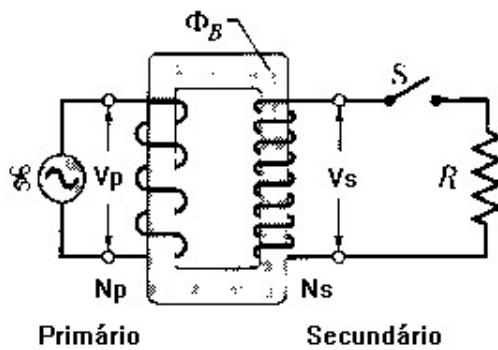


Fig 1 - Transformador ideal com duas bobinas em torno de um núcleo ferromagnético num circuito básico.

O enrolamento secundário, com N_s espiras, é ligado a uma carga resistiva R em série com o interruptor S . Com S aberto não há corrente na bobina secundária. Para as condições acima referidas um transformador ideal apresenta o enrolamento primário como uma indutância pura. Assim sendo, a corrente primária em vazio é denominada corrente de magnetização I_{mag} e está atrasada de 90° em relação à diferença de potencial primária V_p . O factor de potência é nulo e, portanto, a potência activa transferida do gerador para o transformador também é nula. Entretanto, a pequena corrente primária I_{mag} induz um fluxo magnético alternado ϕ_B no núcleo de ferro e este fluxo atravessa as espiras de enrolamento secundário. De acordo com a lei da indução de Faraday, a f.e.m induzida por espira ξ_{esp} é a mesma nos dois enrolamentos. Assim sendo, podemos escrever:

$$\xi_{esp} = \frac{d\phi_B}{dt} = \frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \quad (\text{Equ. 3})$$

$$V_s = V_p \cdot \left(\frac{N_s}{N_p} \right)$$

(Equ. 4)

No caso de $N_s > N_p$, o transformador é elevador de tensão porque apresenta a tensão V_s surge maior que V_p . No caso de $N_s < N_p$, o transformador é redutor de tensão. Nas considerações anteriores, o circuito do secundário estava aberto. Portanto, nenhuma potência era transmitida através do transformador. Vamos agora fechar o interruptor S para que o enrolamento secundário fique ligado à carga resistiva R. Diversos factos acontecem quando fechamos o interruptor S. Uma corrente alternada I_s aparece no circuito secundário, com uma correspondente taxa de dissipação de energia $I_s^2 R$ (V_s^2 / R) na carga resistiva. Esta corrente induz o seu próprio fluxo magnético alternado no núcleo ferromagnético e este fluxo, de acordo com as leis de Faraday e de Lenz, induz uma f.e.m em oposição no enrolamento primário. A tensão, V_p , do primário não é alterada pois é imposta pelo gerador. Para manter V_p , o gerador debita uma corrente alternada I_p no circuito primário. Esta corrente apresenta intensidade e ângulo de fase de forma a cancelar a f.e.m em oposição gerada no enrolamento primário devido a I_s .

Globalmente, mediante a aplicação do princípio da conservação da energia, para um transformador ideal com uma carga resistiva o factor de potência na equação seguinte é unitário.

$$P_{med} = \xi_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$$

(Equ. 5)

Fazendo ξ_{rms} igual a V_p encontramos potência, $I_p V_p$, com que o gerador transfere energia à bobina primária. Analogamente, a taxa com que a energia é transferida da bobina primária para a bobina secundária é igual a $I_s V_s$. Usando o princípio da conservação da energia, encontramos que:

$$I_p \cdot V_p = I_s \cdot V_s$$

(Equ. 6)

Tendo em conta que a razão de transformação é uma constante característica do transformador temos:

$$I_s = I_p \cdot \left(\frac{N_p}{N_s} \right)$$

(Equ. 7)

Finalmente, sabendo que $I_s = V_s/R_s$ e usando as equações já apresentadas de transformação de tensão e de transformação de corrente, obtemos:

$$I_p = \frac{V_p}{(N_p / N_s)^2 \cdot R_s}$$

(Equ. 8)

Esta equação mostra que do ponto de vista do circuito primário a resistência equivalente da carga R_s , é:

$$R_{eq} = \frac{V_p}{I_p} = \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 \cdot R_s$$

(Equ. 9)

Adaptação de Impedâncias

A equação 9 anterior sugere uma outra função para o transformador. Sabemos que, para haver transferência máxima de energia de um dispositivo de f.e.m para uma carga resistiva, a resistência do dispositivo e a resistência da carga devem ser iguais. A mesma relação é válida para circuitos de corrente alternada, excepto que a impedância do gerador deve ser igual ao conjugado da impedância da carga. Frequentemente, como acontece ao ligarmos um altifalante a um amplificador, esta condição fica longe de ser obtida, sendo o amplificador de alta impedância e o alto-falante, de baixa impedância ou vice-versa. Podemos tornar iguais as impedâncias destes dois dispositivos, acoplando-os por meio de um transformador com uma adequada razão entre os números de espiras N_p/N_s .

Trabalho Prático

Equipamento utilizado

- Medidor RLC
- Osciloscópio.
- Transformador 220V/9V, 50Hz.
- Gerador de sinais.

1^a Experiência

Medição directa da indutância apresentada pelos enrolamentos primário e secundário com enrolamento oposto em circuito aberto e em circuito fechado.

Configure o medidor RLC para medir indutância. Nas condições definidas na tabela realize as medições e registe as leituras na coluna correspondente. Note que para colocar um enrolamento em curto-círcuito deve interligar os terminais do enrolamento em causa com um condutor exterior auxiliar.

Vista no	Condição	Indutância (mH)
Primário	Secundário em circuito aberto	
Primário	Secundário em curto-círcuito	
Secundário	Primário em circuito aberto	
Secundário	Primário em curto-círcuito	

2^a Experiência

Obtenção experimental da razão de transformação por aplicação de sinal no circuito de tensão mais elevada.

Monte o circuito referente à figura seguinte (Fig.2).

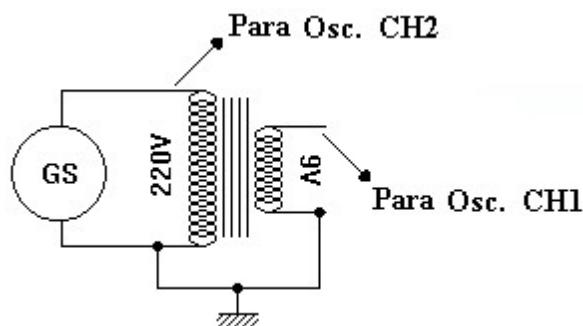


Fig. 2

Considere a tensão pico a pico do sinal aplicado do lado da tensão mais elevada (gerador de sinal, CH2) desde 1V até 10V com incrementos de 1V e com a frequência fixa de 50Hz. Registe na tabela seguinte a tensão pico a pico observada do lado da baixa tensão (CH1). Seguidamente, realize os cálculos referentes a Vin/Vout para cada uma das situações anteriores.

Vin (V) (CH2)	Vout (V) (CH1)	Vin/Vout
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

3^a Experiência

Obtenção experimental da razão de transformação por aplicação de sinal no circuito de tensão menos elevada.

Monte o circuito referente à figura seguinte (Fig.3).

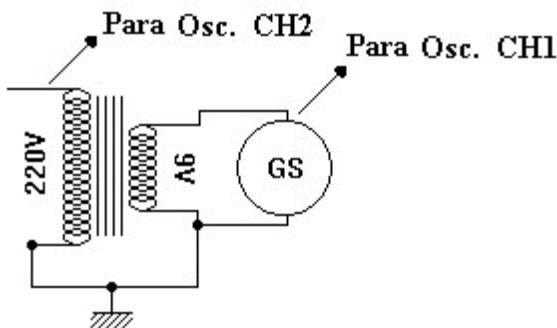


Fig. 3

Tal como na experiência anterior, considere as tensões pico a pico desde 1V até 10V com incrementos de 1V e frequência fixa de 50Hz. Aplique estas tensões, agora, ao lado da tensão menos elevada (gerador de sinal, CH1). Para cada uma destas situações registe na tabela

seguinte a tensão pico a pico observada do lado da tensão mais elevada (CH2). Finalmente, realize os cálculos referentes a Vout/Vin para cada uma das situações anteriores.

Vout (V) (CH2)	Vin (V) (CH1)	Vout/Vin
	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

4^a Experiência

Obtenção experimental da faixa passante do transformador.

Com o mesmo circuito da experiência 2 (Fig.2) considere as frequências de 50Hz até 500Hz com incrementos de 50 Hz e com a tensão fixa de 6V pico a pico. Visualize no osciloscópio e registe o valor pico a pico da forma de onda do lado da baixa tensão. Registe os valores e na tabela seguinte e calcule Vout/Vin.

Freq. (Hz)	Vin (V) CH2	Vout (V) CH1	Vout/Vin
50	6		
100	6		
150	6		
200	6		
250	6		
300	6		
350	6		
400	6		
450	6		
500	6		