

Ejercicio transformador trifásico

31/10/2010

En este ejercicio se van a calcular, utilizando tanto los modelos prácticos como el real del transformador, una serie de magnitudes y podremos comprobar de cuanto es el orden del error que cometemos

1. Ejercicio transformador trifásico

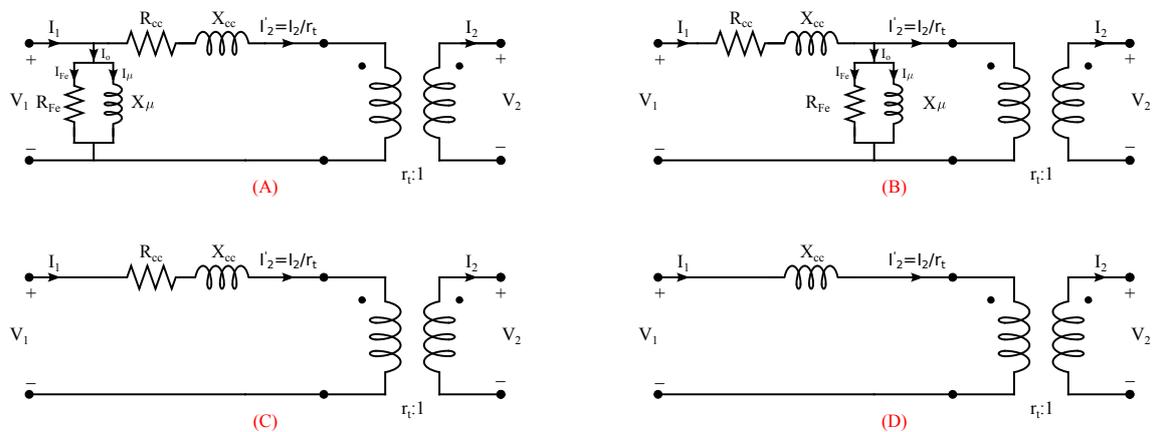


Figura 1: Transformador trifásico que suministra energía a una carga

1.1. Datos del problema (tensión de línea y potencia trifásica)

Dado un transformador trifásico, YNd11, cuyos valores nominales son:

- $S_n = 32 \text{ MVA}$
- $V_{n1} = 132 \text{ kV}$
- $V_{n2} = 21 \text{ kV}$

Y cuyos datos de ensayo en vacío y en cortocircuito son:

- En vacío: realizado en el secundario con $V_{n2}=21\text{kV}$, $P_o = 24015\text{W}$, $I_o = 0.15 (\%)$
- En cortocircuito: realizado en el primario con $I_{n1}=139.96\text{A}$, $P_{cc} = 142104\text{W}$, $V_{cc} (\%) = 12.17$

Calcular:

1. Parámetros del circuito equivalente monofásico del modelo real.
2. Si el transformador está alimentando un consumo de 30MVA con un factor de potencia 0.8i y a una tensión de 20kV en el secundario, calcular utilizando los modelos prácticos A, B, C, D y el real la tensión e intensidad en el primario.

Nota: Los datos del ensayo son tensiones de línea y potencias trifásicas.

1.2. Obtención parámetros del circuito monofásico equivalente

Para el uso del modelo del transformador es más práctico obtener los parámetros de un transformador equivalente con conexión Yy y así se obtiene directamente el circuito monofásico equivalente del trafo. Por ejemplo para este caso calcularíamos los parámetros del secundario conectado en triángulo para luego realizar la conversión a estrella. ¿No es mejor ir directos ya al cálculo del estrella equivalente?. Por otro lado la relación de transformación del estrella equivalente es directa: $r_t = V_{n1}/V_{n2}$ sean estas tensiones de línea o de fase.

Al ser un transformador trifásico, no olvidar que los datos de los ensayos son potencia consumida por las tres fases y la tensión de línea. Salvo este detalle, el procedimiento para obtener los parámetros es el mismo que para el caso monofásico. Procedemos, a continuación, con el cálculo:

Datos del transformador

```
Vn1 = 132e3
Vn2 = 21e3
Sn = 32e6
In1 = Sn/(sqrt(3)*Vn1)
In2 = Sn/(sqrt(3)*Vn2)
rt = Vn1/Vn2
```

```
Vn1 = 132000
Vn2 = 21000
Sn = 32000000
In1 = 139.96
In2 = 879.77
rt = 6.2857
```

Datos de los ensayos de vacío y de cortocircuito:

```
Po = 24015
Io = 0.15/100*In2
Pcc = 142104
Vcc = 12.17/100*Vn1
```

```
Po = 24015
Io = 1.3197
Pcc = 142104
Vcc = 1.6064e+04
```

No olvidar que los ensayos no tienen por que realizarse en el mismo devanado, tal y como pasa en este caso, en que el ensayo de vacío se realizó en el devanado del baja tensión y el de cortocircuito en el de alta.

Vamos a calcular R_{fe} y X_u visto desde el secundario puesto que este ensayo, tal y como ya se ha dicho, se realizó midiendo en el lado del secundario.

```
Rfe2 = (Vn2/sqrt(3))^2/(Po/3)
Xu2 = 1/sqrt((Io/(Vn2/sqrt(3)))^2-(1/Rfe2)^2)
```

```
Rfe2 = 1.8364e+04
Xu2 = 1.0611e+04
```

Convertiremos R_{fe} y X_u a magnitudes del primario sin más que utilizar la propiedad de adaptación de impedancias

```
Rfe = Rfe2*rt^2
Xu = Xu2*rt^2
```

```
Rfe = 7.2555e+05
Xu = 4.1924e+05
```

Vamos a calcular R_{cc} y X_{cc} visto desde el primario puesto que este ensayo se realizó cortocircuitando el secundario y midiendo en el lado del primario.

```
Rcc = Pcc/3/In1^2
Xcc = sqrt((Vcc/sqrt(3)/In1)^2-Rcc^2)
```

```
Rcc = 2.4180
Xcc = 66.222
```

Y ahora nos falta calcular R_1 , R_2 y X_1 y X_2 . Para ello se suele hacer una aproximación y es considerar que la reactancia de dispersión de cada devanado es proporcional al número de espiras al cuadrado y que en el diseño de transformadores se suele hacer que las pérdidas en el primario sean iguales que las pérdidas en el secundario. Estas dos condiciones llevan a que: $R_1 = R_2' = r t^2 R_2$ y que $X_1 = X_2' = r t^2 X_2$ con lo que:

```
R1 = Rcc/2
R2 = Rcc/2/rt^2
X1 = Xcc/2
X2 = Xcc/2/rt^2
```

```
R1 = 1.2090
R2 = 0.030600
X1 = 33.111
X2 = 0.83803
```

1.3. Cálculo de la tensión e intensidad en el primario

Si el transformador está alimentando un consumo de 16MVA con un factor de potencia 0.8i y a una tensión de 20kV en el secundario, calcular utilizando los modelos prácticos A, B, C, D y el real la tensión e intensidad en el primario.

1.3.1. Caso 0: Modelo transformador real

Datos de la tensión e intensidad en la carga y que serán los mismos para el resto de apartados

```
Vlinea_carga = 20e3
Vfase_carga = Vlinea_carga/sqrt(3)
Scarga_trifasica = 16e6*exp(j*acos(0.8))
Scarga_monofasica = Scarga_trifasica/3
Icarga = conj(Scarga_monofasica)/conj(Vfase_carga)
Vcarga_Icarga = [Vfase_carga; Icarga]
```

```
Vlinea_carga = 20000
Vfase_carga = 1.1547e+04
Scarga_trifasica = 1.2800e+07 + 9.6000e+06i
Scarga_monofasica = 4.2667e+06 + 3.2000e+06i
Icarga = 369.50 - 277.13i
Vcarga_Icarga =
```

```
1.1547e+04 + 0.0000e+00i
3.6950e+02 - 2.7713e+02i
```

El problema se puede resolver de varias formas y de ellas lo vamos a resolver por cuadripolos. Para ellos vamos a calcular los parámetros de transmisión de $R_1 + jX_1$, de la rama de vacío, del transformador ideal y de $R_2 + jX_2$ y, a partir de ellos, obtendremos los parámetros de transmisión de todos los modelos.

```
ABCD_R1X1 = [1 (R1+j*X1); 0 1]
ABCD_RfeXu = [1 0; (1/Rfe+1/(j*Xu)) 1]
ABCD_rt = [rt 0; 0 1/rt]
ABCD_R2X2 = [1 (R2+j*X2); 0 1]
```

```
ABCD_R1X1 =
```

```
1.00000 + 0.00000i    1.20899 + 33.11076i
0.00000 + 0.00000i    1.00000 + 0.00000i
```

```
ABCD_RfeXu =
```

```
1.00000 + 0.00000i    0.00000 + 0.00000i
0.00000 - 0.00000i    1.00000 + 0.00000i
```

```
ABCD_rt =
```

```

6.28571  0.00000
0.00000  0.15909
ABCD_R2X2 =

```

```

1.00000 + 0.00000i  0.03060 + 0.83803i
0.00000 + 0.00000i  1.00000 + 0.00000i

```

Una vez calculado los bloques básicos obtendremos los parámetros del trafo real y, a continuación, los datos de la tensión y la intensidad en el origen

```

ABCD_real = ABCD_R1X1*ABCD_RfeXu*ABCD_rt*ABCD_R2X2
V1_I1_real = ABCD_real*Vcarga_Icarga

```

```

ABCD_real =

```

```

6.2862e+00 + 2.6873e-04i  3.8447e-01 + 1.0536e+01i
8.6634e-06 - 1.4993e-05i  1.5910e-01 + 6.8014e-06i

```

```

V1_I1_real =

```

```

7.5649e+04 + 3.7895e+03i
5.8891e+01 - 4.4263e+01i

```

1.3.2. Caso 1: Modelo transformador A

Reordenando las matrices se obtiene el modelo A

```

ABCD_A = ABCD_RfeXu*ABCD_R1X1*ABCD_rt*ABCD_R2X2
V1_I1_A = ABCD_A*Vcarga_Icarga

```

```

ABCD_A =

```

```

6.28571 + 0.00000i  0.38468 + 10.53524i
0.00001 - 0.00001i  0.15912 + 0.00001i

```

```

V1_I1_A =

```

```

7.5643e+04 + 3.7862e+03i
5.8898e+01 - 4.4264e+01i

```

El mismo resultado se obtiene calculando primero los parámetros de transmisión de Rcc y Xcc.

```

ABCD_RccXcc = [1 ((R1+rt^2*R2)+j*(X1+rt^2*X2)); 0 1]
V1_I1_A = ABCD_RfeXu*ABCD_RccXcc*ABCD_rt*Vcarga_Icarga

```

```

ABCD_RccXcc =

```

```

1.00000 + 0.00000i  2.41799 + 66.22152i
0.00000 + 0.00000i  1.00000 + 0.00000i

```

```

V1_I1_A =

```

```

7.5643e+04 + 3.7862e+03i
5.8898e+01 - 4.4264e+01i

```

1.3.3. Caso 2: Modelo transformador B

```

V1_I1_B = ABCD_RccXcc*ABCD_RfeXu*ABCD_rt*Vcarga_Icarga

```

```

V1_I1_B =

```

```

7.5655e+04 + 3.7924e+03i
5.8885e+01 - 4.4262e+01i

```

1.3.4. Caso 3: Modelo transformador C

$$V1_{I1_C} = ABCD_RccXcc*ABCD_rt*Vcarga_Icarga$$

$$V1_{I1_C} =$$

$$\begin{aligned} &7.5643e+04 + 3.7862e+03i \\ &5.8785e+01 - 4.4089e+01i \end{aligned}$$

1.3.5. Caso 4: Modelo transformador D

$$ABCD_Xcc = [1 (j*(X1+rt^2*X2)); 0 1]$$

$$V1_{I1_D} = ABCD_Xcc*ABCD_rt*Vcarga_Icarga$$

$$ABCD_Xcc =$$

$$\begin{aligned} &1.00000 + 0.00000i & 0.00000 + 66.22152i \\ &0.00000 + 0.00000i & 1.00000 + 0.00000i \end{aligned}$$

$$V1_{I1_D} =$$

$$\begin{aligned} &7.5501e+04 + 3.8928e+03i \\ &5.8785e+01 - 4.4089e+01i \end{aligned}$$

1.3.6. Comparación entre los casos

Para poder comparar vamos a calcular los módulos de las tensiones de línea en kV y las potencias trifásicas en MW para finalmente crear una tabla resumen

A continuación vamos a resumir en una tabla los valores obtenidos en dos escenarios de carga y el error cometido por los modelos prácticos referidos al modelo real.

Tabla 1: Tabla obtenida para el consumo $S = 16$ MVA y fdp 0.8i

Caso	V1(kV)	ph _{V1} (°)	I1(A)	ph _{I1} (°)	P1(MW)	Q1(MVAR)	ErrV(%)	ErrP1(%)	ErrQ1(%)
real	131.19	2.8678	73.671	-36.928	12.862	10.715	0.0000	0.0000	0.0000
A	131.18	2.8655	73.677	-36.926	12.863	10.714	-0.0076	0.0078	-0.0093
B	131.20	2.8697	73.665	-36.931	12.861	10.716	0.0076	-0.0078	0.0093
C	131.18	2.8655	73.481	-36.870	12.839	10.673	-0.0076	-0.1788	-0.3920
D	130.94	2.9516	73.481	-36.870	12.800	10.673	-0.1906	-0.4820	-0.3920

Tabla 2: Tabla obtenida para el consumo $S = 32$ MVA y fdp 0.8i

Caso	V1(kV)	ph _{V1} (°)	I1(A)	ph _{I1} (°)	P1(MW)	Q1(MVAR)	ErrV(%)	ErrP1(%)	ErrQ1(%)
real	136.96	5.4978	147.16	-36.898	25.781	23.537	0.0000	0.0000	0.0000
A	136.95	5.4975	147.17	-36.896	25.783	23.535	-0.0073	0.0078	-0.0085
B	136.97	5.4994	147.15	-36.900	25.779	23.539	0.0073	-0.0078	0.0085
C	136.95	5.4957	146.96	-36.870	25.757	23.491	-0.0073	-0.0931	-0.1954
D	136.50	5.6698	146.96	-36.870	25.600	23.491	-0.3359	-0.7021	-0.1954

Tal y como vemos, no parece que el nivel de carga del transformador tenga una influencia crítica. El uso del modelo D sigue sin superar el error del 1%.

Y, para finalizar, vamos a poner una tabla con el error obtenido para el consumo de 30 MVA y fdp 0.9i y vemos como varía el error en función del fdp.

Tabla 3: Tabla obtenida para el consumo $S = 32$ MVA y fdp 0.9i

Caso	V1(kV)	ph _{V1} (°)	I1(A)	ph _{I1} (°)	P1(MW)	Q1(MVAR)	ErrV(%)	ErrP1(%)	ErrQ1(%)
real	134.45	6.3661	147.14	-25.883	28.980	18.285	0.0000	0.0000	0.0000
A	134.44	6.3640	147.15	-25.881	28.982	18.282	-0.0074	0.0069	-0.0164
B	134.47	6.3676	147.13	-25.886	28.979	18.287	0.0149	-0.0035	0.0109
C	134.44	6.3640	146.96	-25.842	28.957	18.239	-0.0074	-0.0794	-0.2516
D	133.92	6.5044	146.96	-25.842	28.800	18.239	-0.3942	-0.6211	-0.2516