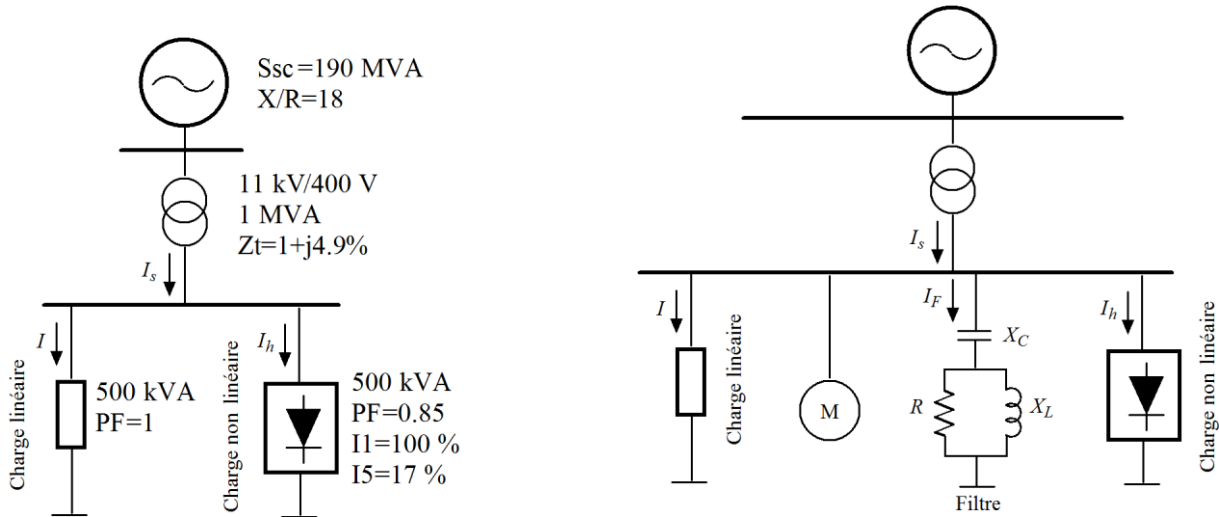


Série de TD2

Ex1 : Soit le réseau de la figure1 . Le primaire du transformateur est couplé en D alors que le secondaire est couplé en Yg.

Prendre comme base 10 MVA, 11 kV/400 V.

- 1- A la fréquence fondamentale, calculer les impédances équivalentes du réseau amont, du transformateur, des charges.
- 2- Déduire la tension au jeu de barre BT (n'oublier pas de prendre en considération le couplage de transformateur).
- 3- Déduire les impédances du réseau, du transformateur et de la charge linéaire en fonction du rang harmonique.
- 4- Calculer les tensions aux jeux de barres BT et HT en présence de l'harmonique 5 (17%). Déduire les THD de ces tensions. Comparez ces THD aux limites tolérées.
- 5- Calculer le courant absorbé par la charge linéaire et déduire son THD.



Ex2 : Soit le réseau de la figure 2 avec les données suivantes :

Réseau HT : 300 kV, $S_{sc}(3ph)=1000$ MVA, $S_{sc}(1ph)=900$ MVA, $X/R=10$;

Transformateur : 300/22 kV, 90 MVA, $Z_T=0.38+j11.99\%$, Y/Yg, $R_g=476.3 \Omega$;

Moteur : 22 kV, $P_{utile}=12.5$ MW, $PF=0.86$, $\eta=88\%$, $X_M=20\%$, $X/R=10$, connexion D ;

Charge linéaire : 22 kV, 5 MVA, $PF=0.94$;

Convertisseur : $P_{utile}=24.64$ MW, $PF=0.85$, $\eta=96\%$,

h	1	3	5	7	11	13
%Ih	100	0.4	1.8	1.6	6.6	5.4

Filtre passe haut: 22 kV, $Q_C=8$ MVar, $Q=3$, $h_n=10.65$.

Prendre comme base : 100 MVA, 300/22 kV

- 1- Calculer les impédances équivalentes de chaque élément du réseau. (en séquence positive, négative et homopolaire).
- 2- Calculer les tensions aux deux jeux de barres de ce réseau. Déduire les THD.
- 3- Calculer les courants absorbés par le moteur, la charge linéaire, le filtre et le celui du transformateur. Déduire les THD.

Corrigé

Exercice 1

A fréquence fondamentale, les impédances des éléments du réseau sont calculées sur la base 11 kV/400 V, 10 MVA comme suit :

Pour le réseau HT

$$Z_s(1) = \left(\frac{V_{HT}^2}{S_{sc}} \right)^{\angle \tan(18)} = \frac{1}{19} \angle 86.8^\circ = 0.0029 + j0.0525 \text{ pu}$$

L'impédance du transformateur est donnée par rapport à sa tension et sa puissance nominale. Celle-ci est différente de la puissance de base (10 MVA) c'est pourquoi il faut recalculer cette impédance dans la nouvelle base comme

$$Z_T(1) = Z_T^{old}(1) \times \left(\frac{S_B^{new}}{S_B^{old}} \right) \left(\frac{V_B^{old}}{V_B^{new}} \right)^2 = (0.01 + j0.049) \times 10 = 0.1 + j0.49 \text{ pu}$$

Pour les charges linéaire et non linéaire

$$Z_L(1) = \frac{V_{BT}^2}{S_L} = \frac{1}{\frac{0.5}{10}} = 20 \text{ pu}, \quad Z_{NL}(1) = \left(\frac{V_{BT}^2}{S_{NL}} \right)^{\angle \cos(0.85)} = \left(\frac{1}{0.5/10} \right)^{\angle 31.8^\circ} = 17 + j 10.53 \text{ pu}$$

La tension au jdb BT (400 V) peut être déduite alors en appliquant un diviseur de tension

$$V_{BT}(1) = \frac{Z_L(1) // Z_{NL}(1)}{Z_s(1) + Z_T(1) + (Z_L(1) // Z_{NL}(1))} \times 1 \times (1 \angle -30^\circ) = 0.9775 \angle -32.5^\circ \text{ pu}$$

Le déphasage de -30° est causé par le transformateur

NB. Déphasage entre le primaire et secondaire dans un transformateur

Dans un transformateur DY ou YD

- Au secondaire, une tension (ou un courant) de **séquence directe** est en retard de 30° par rapport au primaire
- Au secondaire, une tension (ou un courant) de **séquence inverse** est en avance de 30° par rapport au primaire

Les impédances du réseau HT, du transformateur et de la charge linéaire sont écrites alors en fonction du rang harmonique (direct et inverse uniquement) comme suit

$$Z_s(h) = 0.0029 + j0.0525h \text{ pu}, \quad Z_T(h) = 0.1 + j0.49h \text{ pu}, \quad Z_L(h) = 20 + j0h \text{ pu}$$

En présence de l'harmonique 5, les tensions aux jdb BT et HT auront également une composante harmonique d'ordre 5 à cause de la propagation de cet harmonique, ainsi les tensions efficaces seront calculées par

$$V_{BT}(1) = \sqrt{V_{BT}^2(1) + B_{BT}^2(5)}, \quad V_{HT} = \sqrt{V_{HT}^2(1) + B_{HT}^2(5)}$$

$V_{BT}(1)$ est déjà calculée est égale $0.9775 \angle -32.5^\circ$, $V_{HT}(1) = 1$. Les tensions harmoniques sont calculées par

$$V_{BT}(5) = Z_{eq}(5) \times I_{NL}(5)$$

Avec $Z_{eq}(5)$, l'impédance équivalente vu à partir de la charge non linéaire (source de l'harmonique 5). Ainsi

$$Z_{eq}(5) = (Z_s(5) + Z_T(5)) // Z_L(5) = 2.67 \angle 80^\circ \text{ pu}$$

Le courant $I_{NL}(5)$ égale 17% du fondamental. Celui-ci est calculé comme suit

$$I_{NL}(1) = I_{NL}^{old} \times \left(\frac{S_B^{old}}{S_B^{new}} \right) \left(\frac{V_B^{new}}{V_B^{old}} \right) = 1 \times \left(\frac{0.5}{10} \right)^{\angle -32.5^\circ - 31.8^\circ} = 0.05 \angle -64.3^\circ \text{ pu}$$

$$I_{NL}(5) = 17\% I_{NL}(1) = 0.17 \times 0.05 \angle 5 \times (-64.3^\circ) = 0.0085 \angle 38.5^\circ \text{ pu}$$

On déduit alors

$$V_{BT}(5) = 0.0227 \angle 118.5^\circ \text{ pu}$$

$$V_{BT} = \sqrt{0.9775^2 + 0.0227^2} = 0.9777 \text{ pu}$$

La tension $V_{HT}(5)$ est donnée par

$$V_{HT}(5) = Z_s(5) \times I_{T(HT)}(5)$$

Le courant harmonique de rang 5 dans le transformateur est calculé au secondaire comme suit

$$I_{T(BT)}(5) = \frac{V_{BT}(5)}{Z_T(5) + Z_s(5)} = 0.0083^{\angle 30.8^\circ} \text{ pu}$$

Le courant côté primaire est de même amplitude (en pu) mais tenant compte du couplage du transformateur, il est en retard de 30° , soit

$$I_{T(HT)}(5) = I_{T(BT)}(5)^{\angle -30^\circ} = 0.0083^{\angle 0.8^\circ} \text{ pu}$$

Ainsi

$$V_{HT}(5) = 0.00217^{\angle 90^\circ} \text{ pu}$$

$$V_{HT} = \sqrt{1^2 + 0.00217^2} = 1.0000023 \text{ pu}$$

En déduit alors les taux de distorsions

$$THD_{V(BT)}(\%) = \frac{V_{BT}(5)}{V_{BT}(1)} \times 100 = 2.32\%, \quad THD_{V(HT)}(\%) = \frac{V_{HT}(5)}{V_{HT}(1)} \times 100 = 0.22\%,$$

D'après la norme IEC 61000-2-4, pour une tension inférieure à 1 kV, les limites tolérées sont

	V<1 kV	V>1 kV
Harmoniques impaires	THD_V individuel ≤ 08%	THD_V individuel ≤ 06%
Harmoniques paires	THD_V individuel ≤ 03%	THD_V individuel ≤ 02%
Harmoniques multiples de 3	THD_V individuel ≤ 06%	THD_V individuel ≤ 05%
Tous les harmoniques	THD_V ≤ 10%	THD_V ≤ 08%

On peut conclure donc que les taux de distorsions en tension sont dans des limites tolérables

Les courants absorbés par la charge linéaire

A cause de la distorsion de la tension au jdb BT, la charge linéaire absorbera un courant harmonique

$$I_L(1) = \frac{S_L}{V_{BT}(1)} = 0.0511^{\angle -32.5^\circ} \text{ pu}, \quad I_L(5) = \frac{V_{BT}(5)}{Z_L(5)} = 0.00114^{\angle 118.6^\circ} \text{ pu}$$

Ainsi

$$I_L = \sqrt{0.0511^2 + 0.00114^2} = 0.05116 \text{ pu}$$

$$THD_{IL}(\%) = \frac{I_L(5)}{I_L(1)} \times 100 = 2.22\%,$$

Le courant au secondaire du transformateur

$$I_{T(BT)} = \sqrt{I_{T(BT)}^2(1) + I_{T(BT)}^2(5)}$$

Le courant fondamental dans le transformateur est calculé au secondaire et au primaire comme suit

$$I_{T(BT)}(1) = I_L(1) + I_{NL}(1) = 0.097^{\angle -48.2^\circ} \text{ pu}, \quad I_{T(HT)}(1) = I_{T(BT)}^{\angle +30^\circ} = 0.097^{\angle -18.2^\circ} \text{ pu}$$

D'où

$$I_T = \sqrt{0.097^2 + 0.05^2} = 0.0976 \text{ pu}$$

$$I_{T(HT)}(5) = I_{T(BT)}(5)^{\angle -30^\circ} = 0.0083^{\angle 0.8^\circ} \text{ pu}$$

Résumé

	BT	HT
V Base (kV)	0.400	11
S Base (MVA)	10	10
Z Base (Ω)	12.1	0.016
I Base (A)	14433.75	524.86
Tension Jdb (pu)	V1=(0.9775, -32.5°), V5=(0.0227, 118°), V=0.9777	V1=(1, 0°), V5=(0.00217, 90°), V=1.0000023
Tension jdb (kV)	V1=(391, -32.5°), V5=(9.08, 118°) V=391.08	V1=(11, 0°), V5=(0.0238, 90°), V=11.000025
THD_V (%)	2.32	0.22
Courant charge non linéaire (pu)	I1=0.05, -64.3°, I5=0.0085, 38.5°, I=0.05071	
Courant charge non linéaire (A)	I1=721.68, -64.3°, I5=122.68, 38.5°, I=731.93	
THD I, charge non linéaire (%)	17	
Courant charge linéaire (pu)	I1=0.0511, -32.5°, I5=0.00114, 118.6°, I=0.05116	
Courant charge linéaire (A)	I1=737.56, -32.5°, I5=16.45, 118.6°, I=738.43	
THD_I charge linéaire (%)	2.22	
Courant dans le transformateur (pu)	I1=(0.097, -48.2°), I5=(0.0083, 30.8°), I=0.0976	I1=(0.097, -18.2°), I5=(0.0083, 0.8°), I=0.0976
Courant dans le transformateur (A)	I1=(1400, -48.2°), I5=(119.8, 30.8°) I=1408.73	I1=(50.91, -18.2°), I5=(4.35, 0.8°), I=51.22

Exercice 2

Avec 100 MVA et 300/22 kV comme base, les courants et impédance de base sont calculés côtés HT et MT comme

$$I_{B(HT)} = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{B(HT)}} = 192.45 \text{ A}, \quad I_{B(MT)} = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{B(MT)}} = 2624.32 \text{ A}$$

$$Z_{B(HT)} = \frac{V_{B(HT)}^2}{S_B} = 900 \Omega, \quad I_{B(MT)} = \frac{V_{B(MT)}^2}{S_B} = 4.84 \Omega$$

1. Calcul des impédances

Pour le réseau HT, le transformateur et les charges, les impédances de séquence positive et négative sont les mêmes. L'impédance de séquence homopolaire est calculée différemment. Ces impédances sont calculées à la fréquence fondamentale comme suit :

Réseau HT

$$Z_s^+ = Z_s^- = \frac{V_{HT}^2}{S_{sc(3ph)}} = \frac{1}{10} \angle \tan^{-1}(10) = 0.1 \angle 84.3^\circ = 0.00994 + j0.0994 \text{ pu},$$

$$Z_s^0 = 3 \frac{V_{HT}^2}{S_{sc(1ph)}} - 2Z_s^+ = 0.133 \angle 84.3^\circ = 0.0132 + j0.1327 \text{ pu}$$

Transformateur

$$Z_T^+ = Z_T^- = Z_T(\text{pu}) \times \left(\frac{S_B^{\text{new}}}{S_B^{\text{old}}} \right) \left(\frac{V_B^{\text{old}}}{V_B^{\text{new}}} \right) = (0.0038 + j0.1199) \frac{100}{90} = 0.0042 + j0.133 \text{ pu}$$

$$Z_T^0 = Z_T^+ + \frac{3R_g}{Z_{B(BT)}} = 295.21 + j0.133 \text{ pu}$$

Moteur

$$S_M = \frac{P_u}{PF_M \times \eta} = 16.51 \text{ MVA} \equiv \frac{16.51}{100} = 0.1651 \text{ pu}$$

$$X_M^+ = X_M^- = X_M(\text{pu}) \times \left(\frac{S_B^{\text{new}}}{S_B^{\text{old}}} \right) \left(\frac{V_B^{\text{old}}}{V_B^{\text{new}}} \right) = 0.2 \frac{100}{16.51} = 1.21 \text{ pu}$$

$$R_M = \frac{X_M}{10} = 0.121 \text{ pu}$$

D'où

$$Z_M^+ = Z_M^- = 0.121 + j1.21 \text{ pu}$$

$$Z_M^0 = \infty \text{ pu}$$

Charge linéaire

$$Z_L^+ = Z_L^- = \left(\frac{1}{S_L} \right)^{\angle \cos(0.94)} = \left(\frac{1}{0.05} \right)^{\angle 19.95} = 18.8 + j6.82 \text{ pu}$$

$$Z_L^0 = \infty \text{ pu}$$

Charge non linéaire

$$Z_{NL}(1) = \left(\frac{1}{S_L} \right)^{\angle \cos(0.85)} = 2.814 + j1.744 \text{ pu}$$

Filtre

$$X_C = \frac{V_{BT}^2}{Q_C} = 60.5 \text{ } \Omega, \quad X_L = \frac{X_C}{h_n^2} = 0.533 \text{ } \Omega, \quad R = \sqrt{X_C X_L} Q = 17.04 \text{ } \Omega$$

En pu avec $Z_{B(BT)} = 4.84 \text{ } \Omega$

$$X_C = 12.5 \text{ pu}, \quad X_L = 0.11 \text{ pu}, \quad R = 3.52 \text{ pu}$$

D'où

$$Z_F = \frac{jX_L R}{R + jX_L} - jX_C = \frac{j0.387}{3.52 + j0.11} - j12.5 \text{ pu}$$

Les impédances calculées ci-dessus représentent $Z(1)$. En fonction de la fréquence, les impédances calculées seront exprimées comme suit

$$\begin{cases} Z_s^+(h) = Z_s^-(h) = 0.00994 + j0.0994h \text{ pu}, & h = 3n \pm 1 \text{ (harmoniques de séq directs et inverses)} \\ Z_s^0(h) = 0.0132 + j0.1327h \text{ pu}, & h = 3n \text{ (harmoniques de séq homopolaire)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_T^+(h) = Z_T^-(h) = 0.0042 + j0.133h \text{ pu}, & h = 3n \pm 1 \text{ (harmoniques de séq directs et inverses)} \\ Z_T^0(h) = 295.21 + j0.133h \text{ pu}, & h = 3n \text{ (harmoniques de séq homopolaire)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_M^+(h) = Z_M^-(h) = 0.121 + j1.21h \text{ pu}, & h = 3n \pm 1 \text{ (harmoniques de séq directs et inverses)} \\ Z_M^0(h) = \infty, & h = 3n \text{ (harmoniques de séq homopolaire)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_L^+(h) = Z_L^-(h) = 18.8 + j6.82 h \text{ pu}, & h = 3n \pm 1 \text{ (harmoniques de séq directs et inverses)} \\ Z_L^0(h) = \infty, & h = 3n \text{ (harmoniques de séq homopolaire)} \end{cases}$$

$$Z_F(h) = \frac{j0.387h}{3.52 + j0.11h} - \frac{j12.5}{h}, h = 1: \infty \text{ pu}$$

2. Calcul des tensions et des courants

Les tensions aux jeux de barres MT (22 kV) et HT (300 kV) sont calculées comme suit :

$$V_{MT} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{MT}^2(h)}, \quad V_{HT} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{HT}^2(h)}$$

Avec un diviseur de tension,

$$V_{MT}(1) = \frac{Z_{NL}(1)/Z_L(1)/Z_M(1)/Z_F(1)}{(Z_{NL}(1)/Z_L(1)/Z_M(1)/Z_F(1)) + Z_T(1) + Z_s(1)} \times 1 \text{ pu}, \quad V_{HT}(1) = 1 \text{ pu}.$$

NB. Il n'y a aucun déphasage entre la tension primaire et secondaire puisque le transformateur est couplé en YY

Remarque : pour calculer plus facilement la tension VMT(1), calculer la puissance S total (charge non linéaire, charge linéaire, moteur, filtre) et déduire directement l'impédance équivalente entre tous ces éléments. Il faut noter que la puissance du filtre est donnée par

$$S_F = \frac{1}{Z_F(1)} \approx -j0.0807 \text{ pu}$$

Les courants fondamentaux sont données par

$$I_{NL}(1) = \left(\frac{S_{NL}}{V_{MT}(1)} \right)^*, I_L(1) = \left(\frac{S_L}{V_{MT}(1)} \right)^*, I_M(1) = \left(\frac{S_M}{V_{MT}(1)} \right)^*, I_F(1) = \frac{V_{MT}(1)}{Z_F(1)}, I_T(1) = I_{NL}(1) + I_L(1) + I_M(1) + I_F(1)$$

Les autres tensions harmoniques $V_{MT}(h)$ sont données par

$$V_{MT}(h) = Z_{eq}(h) \times I_{NL}(h)$$

$Z_{eq}(h)$: L'impédance équivalente de rang h , vue par le courant harmonique $I_{NL}(h)$ de la charge non linéaire. Ainsi

$$Z_{eq}(h) = (Z_L(h) // Z_M(h) // Z_F(h)) // (Z_T(h) + Z_s(h))$$

Les courants de la charge non linéaire sont donnés par

$$I_{NL}(h) = (\%I_{NL}(h) \times I_{NL}(1))^{\angle \phi}, \text{ avec } \phi \text{ égale } h \text{ fois la phase de } I_{NL}(1)$$

Les courants harmoniques absorbés par les autres charges et le filtre sont donnés par

$$I_L(h) = \frac{V_{MT}(h)}{Z_L(h)}, I_M(h) = \frac{V_{MT}(h)}{Z_M(h)}, I_F(h) = \frac{V_{MT}(h)}{Z_F(h)}, I_T(h) = \frac{V_{MT}(h)}{Z_s(h) + Z_T(h)}$$

Côté HT, la tension fondamentale égale 1 et les tensions harmoniques sont données par

$$V_{HT}(h) = Z_s(h) \times I_T(h)$$

Résultats de calcul (en pu)

	iNL	phase	IL	phase	IM	phase	IF	phase	IT	phase	VMT	phase	VHT	phase
RMS	0.3192		0.05274		0.1740		0.0836		0.5095		0.950		1.0001	
Fond	0.3180	-37.30	0.0527	-25.46	0.1739	-36.19	0.0766	84.46	0.5092	-28.34	0.949	-5.51	1.00	0
3	0.0013	-111.48	0.0000	0	0	0	0.0013	-111.16	0.0000	159.14	0.005	159.3	0.000	-112.7
5	0.0057	173.48	0.0004	-162.75	0.0017	169.53	0.0054	-14.06	0.0091	169.08	0.010	-101.6	0.0045	-102.05
7	0.0051	98.88	0.0001	-18.64	0.0025	-39.30	0.0200	131.13	0.0130	-39.62	0.021	49.87	0.0091	49.55
11	0.0210	-50.32	0.0001	-123.91	0.0006	-137.46	0.0211	-39.95	0.0031	-137.6	0.008	-47.98	0.0034	-48.18
13	0.0172	-124.93	0.0001	-164.54	0.0005	-176.06	0.0152	-114.65	0.0029	-176.2	0.008	-86.5	0.0037	-86.68
THD	8.87		0.977		1.817				3.229		2.83		1.132	
K									0.272					

Le facteur K d'un transformateur est un indice de sécurité

$$K = \frac{\sum_{h=1} (h I_T(h) / I_T(1))^2}{1 + THD_{IT}^2} = 1.05$$

Les courants et tensions en unités réelles sont obtenu en multipliant les valeurs en pu par les bases respectives. On obtient alors les valeurs données dans le tableau suivant

	iNL	IL	IM	IF	ITBT	ITHT	VMT	VHT
RMS	837.72	138.178	456.51	219.3	1337.1	98.05	20.90	300.03
Fond	834.45	138.17	456.43	201.14	1336.4	98.00	20.89	300
3	3.33	0.00	0.00	3.33	0.00	0.00	0.107	0.002
5	15.02	0.71	4.59	14.15	23.9	1.75	0.233	1.360
7	13.35	1.08	6.57	52.46	34.2	2.50	0.467	2.723
11	55.07	0.27	1.56	55.44	8.2	0.60	0.175	1.021
13	45.05	0.25	1.43	39.92	7.5	0.55	0.190	1.104