

## 14. REGIMUL DEFORMANT

### 14.1. NOȚIUNI INTRODUCATIVE

Regimul deformant constituie o problemă complexă a sistemelor electroenergetice reprezentată prin trei probleme:

1. Cauzele și condițiile în care apar armonicile cu frecvență superioară de tensiune și de curent.
2. Consecințele acestora asupra funcționării rețelelor și receptoarelor de energie electrică.
3. Măsurile necesare pentru atenuarea acestui fenomen.

Receptoarele de energie electrică cum sunt:

- redresoarele, convertoarele;
- cuptoarele electrice cu arc;
- transformatoarele de sudură;
- elemente neliniare din rețele;

constituie cauza apariției regimurilor nesinusoidale.

În prezența acestor receptoare undele de tensiune și de curent apar deformate.

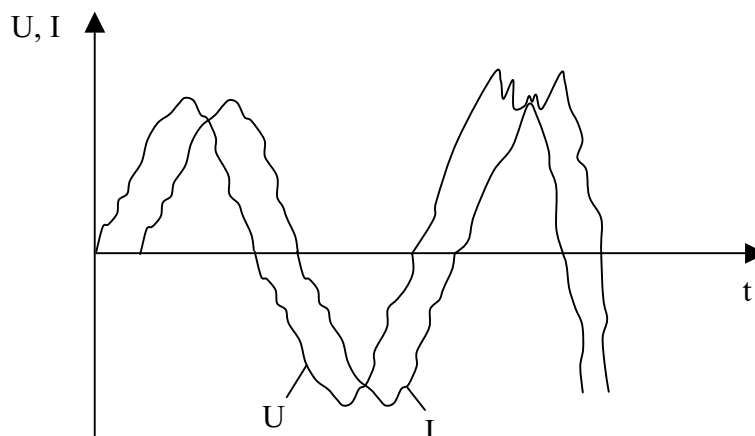


Fig.14.1. Deformarea undei de tensiune și de curent

Metoda uzuală de studiu a regimului deformat este analiza armonică ce constă în descompunerea undei reale de curent sau tensiune în componente sinusoidale:

- o componentă sinusoidală la frecvența de 50 Hz numită fundamentală;
- componente armonice care sunt unde de frecvență superioară (multipli întregi ai frecvenței de bază).

Întrucât regimul deformant este influențat și de prezența bateriilor de condensatoare montate pentru îmbunătățirea factorului de putere se va lua în considerare și prezența acestora.

Se vor studia mărimile caracteristice pentru regimul deformant care sunt:

- reziduul deformant;
- coeficientul de distorsiune.

Măsurile ce se iau pentru reducerea regimului deformant constau în montarea de filtre pentru reducerea gradului de deformare.

Se va analiza regimul deformant pentru un singur nod al unei rețele electrice care poate fi constituit dintr-o secție de bare (A), de medie tensiune a unei stații de transformare de 110/6 kV de tip racord adânc, care funcționează separat prin cupla longitudinală deschisă de cealaltă secție de bare. [16]

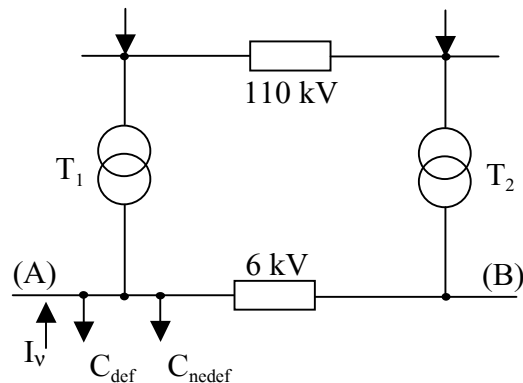


Fig.14.2. Schema de principiu pentru studiul regimului deformant

Pentru acest tip de schemă se vor analiza situațiile prezentate în continuare:

1. Este prezent regimul deformant datorat prezenței consumatorilor deformanți locali fără compensarea puterii reactive

Schema echivalentă este următoarea:

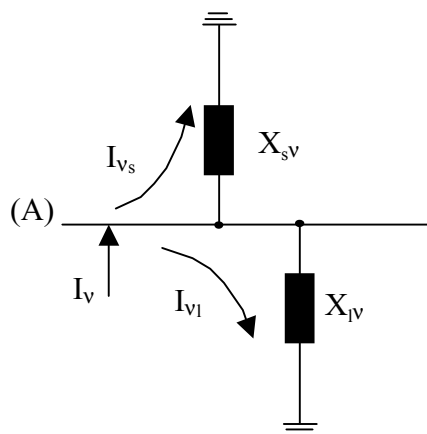


Fig.14.3. Schema echivalentă pentru situația 1

Semnificația mărimilor este:

$X_{sv}$  = reactanța sistemului corespunzătoare armonicii  $v$ ;

$X_{lv}$  = reactanța consumatorilor nedeformanți corespunzătoare armonicii  $v$ ;

- $I_v$  = armonicile de curent injectate de consumatorii deformanți;
- $I_{vs}$  = componentele curenților armonici care circulă spre sistemul energetic;
- $I_{vl}$  = componentele curenților armonici care circulă spre consumatorii nedeformanți.

2. Se consideră și existența bateriilor de condensatoare necesare pentru ameliorarea factorului de putere [16]

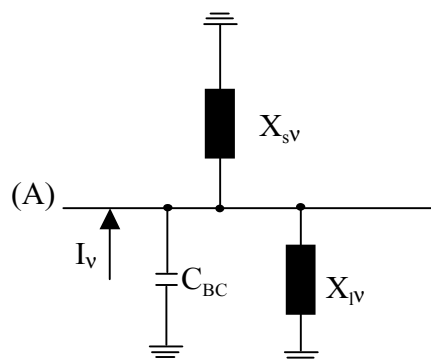


Fig.14.4.Schema echivalentă pentru situația 2

Prin prezența lor, bateriile de condensatoare amplifică regimul deformant.

3. Se examinează măsurile necesare pentru atenuarea regimului deformant

Aceste măsuri constau în montarea de filtre pentru atenuarea uneia sau mai multor armonici de curent astfel că în nodul considerat coeficientul de distorsiune al tensiunii să fie mai mic decât valoarea prevăzută în normative, adică 5%. [16]

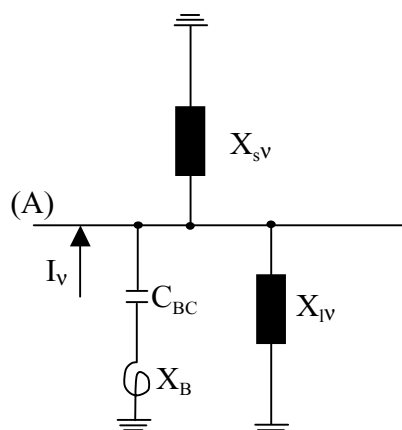


Fig.14.5. Schema echivalentă pentru situația 3

Filtrul se realizează din capacitatea bateriei de condensatoare montată pentru ameliorarea factorului de putere înseriată cu o bobină a cărei reactanță se calculează astfel încât filtrul să absoarbă o armonică de curent de un anumit ordin.

## 14.2. SPECIFICAȚII CU PRIVIRE LA ELEMENTELE DIN SCHEMELE PREZENTATE

- a) Schemele echivalente ale rețelelor se consideră formate numai din reactanțe.
- b) Reactanțele din scheme, pentru diferite armonici, se consideră că sunt direct proporționale cu ordinul  $v$  al acestora:

$$X_v = v \cdot X_1 \quad (14.1)$$

unde:  $X_1$ =reactanța fiecărui element calculată pentru frecvența de 50 Hz a undei fundamentale.

- c) Reactanța sistemului până la nodul care se examinează se calculează folosindu-se puterea de scurtcircuit dată de sistem:

$$X_s = \frac{U_{NS}^2}{S_{sc}} \quad (14.2)$$

- d) Reactanța consumatorilor nedeformanți se calculează cunoscându-se puterea aparentă a consumatorilor nedeformanți și factorul de putere natural.

$$X_1 = \frac{U_A^2}{Q_c} = \frac{U_A^2}{S_{c_{nedef}} \cdot \sin \varphi_{\text{natural}}} \quad (14.3)$$

- e) Pentru reducerea volumului de calcule din numărul total de armonici care poate fi  $n=40$  se rețin numai 3 armonici, cele mai frecvent întâlnite, respectiv  $v=5, 7, 11$ .

## 14.3. ETAPELE DE CALCUL PENTRU SCHEMA DE TIP RACORD ADÂNC CONSIDERATĂ

### 14.3.1. Există numai consumatorii deformanți și nedeformanți

Schema echivalentă este următoarea: [16]

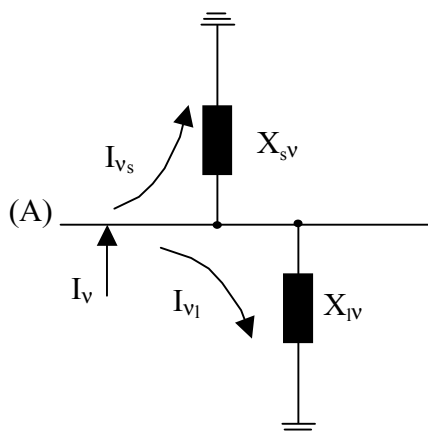


Fig.14.6. Schema echivalentă pentru situația considerată

Datele inițiale sunt următoarele:

- a) Se cunosc puterile active și reactive preluate din rețea de consumatori deformanți și nedeformanți corespunzătoare factorului de putere natural (necompensat)  $(P, Q)_{\text{def}}$  și  $\text{nedef}$  și  $\cos\varphi_{\text{natural}}$ .
- b) Se cunosc:
  - spectrul armonicilor de curent față de curentul fundamental ( $v$ );
  - ponderea armonicilor de curent ( $n_v$ ) [%].

*Mărimile care se calculează:*

- a) Se calculează armonicile de curent  $I_v$  injectate de consumatorii deformanți:

$$I_v = n_v[\%] I_{1\text{def}} \quad (14.4)$$

$I_{1\text{def}}$  = valoarea efectivă a curentului fundamental absorbit de consumatorii deformanți.

- b) Se calculează reziduul deformant al curentului consumatorilor deformanți.

$$I_{\text{rez}} = \sqrt{\sum_{v=5}^{11} I_v^2} \quad (14.5)$$

$v=5; 7; 11$

- c) Se calculează coeficientul de distorsiune al curentului consumatorilor deformanți.

$$\delta I_{\text{def}} = \frac{I_{\text{rez}}}{I_{1\text{def}}} \cdot 100[\%] \quad (14.6)$$

- d) Se determină componentele curenților armonici  $I_{vs}$  care circulă spre sistemul energetic și  $I_{vl}$  care circulă spre consumatorii nedeformanți locali  $C_{\text{nedef}}$ .

Cele două reactanțe  $X_{sv}$  și  $X_{lv}$  se consideră în paralel.

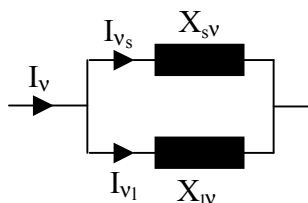


Fig.14.7. Schema echivalentă

$$\begin{cases} I_v = I_{vs} + I_{vl} \\ I_{vs} \cdot X_{sv} = I_{vl} \cdot X_{lv} \end{cases} \quad (14.7)$$

$$(14.8)$$

Rezultă:

$$I_v = I_{vs} + I_{vs} \frac{X_{sv}}{X_{lv}} \quad (14.9)$$

$$I_{vs} \frac{X_{sv} + X_{lv}}{X_{lv}} = I_v \quad (14.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{vs} = I_v \frac{X_{lv}}{X_{sv} + X_{lv}} \end{array} \right. \quad (14.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{vl} = I_v \frac{X_{sv}}{X_{sv} + X_{lv}} \end{array} \right. \quad (14.12)$$

e) Pentru fiecare din cele două căi de curent spre sistem și spre consumatorii nedeformanți se calculează reziduul deformant și coeficientul de distorsiune.

$$I_{rez} = \sqrt{\sum_{v=5}^{11} I_{v(s,l)}} \quad (14.13)$$

v=5; 7; 11

$$\delta I_{def} = \left( \frac{I_{rez}}{I_{ldef}} \right)_{(s,l)} \cdot 100 [\%] \quad (14.14)$$

f) Se calculează armonicile de tensiune  $U_v$  la bara A, care reprezintă de fapt căderile de tensiune corespunzătoare curenților armonici  $I_{vs}$ , datorită reactanței sistemului  $X_{sv}$ .

g) Cu valorile determinate  $U_v$  se calculează pentru tensiunea de la bara A:

- reziduul deformant

$$U_{Arez} = \sqrt{\sum_{v=5}^{11} U_v^2} \quad (14.15)$$

v=5; 7; 11

- coeficientul de distorsiune

$$\delta U_{Adef} = \frac{U_{Arez}}{U_{1A}} \cdot 100 [\%] \quad (14.16)$$

unde:  $U_{1A}$  = valoarea reală a tensiunii de la bară indicată de aparatele de măsurat.

h) Se calculează valoarea efectivă a undei de tensiune deformată de la bara A.

$$U_{Adef} = \sqrt{\sum_{v=1}^{11} U_v^2} \quad (14.17)$$

$v=1; 5; 7; 11$

În cazul în care valoarea coeficientului de distorsiune a tensiunii  $\delta U_{Adef} < 5\%$  se poate considera că regimul deformant există dar nu necesită măsuri pentru atenuare.

### 14.3.2. Influența prezenței bateriilor de condensatoare

În majoritatea cazurilor din cauza valorii reduse a factorului de putere atât al consumatorilor deformanți cât și a celor nedeformanți se prevăd pe barele stațiilor baterii de condensatoare.

Acestea prin prezența lor influențează caracteristicile regimului deformant inițial.

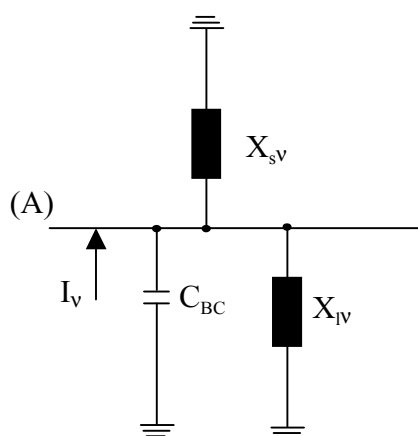


Fig.14.8. Schema echivalentă a situației considerată

Datele inițiale

- Se cunosc puterile active și reactive ale consumatorilor deformanți și nedeformanți corespunzătoare factorului de putere natural.
- Se cunosc spectrul ( $v$ ) și ponderea  $n_v[\%]$  armonicilor de curent față de curentul fundamental.
- Se cunosc caracteristicile bateriei de condensatoare:

$$Q_{BC} = P_{total} (\text{tg } \varphi_{natural} - \text{tg } \varphi_{neutral}) \quad (14.18)$$

$$C_{BC} = \frac{Q_{BC}}{\omega U_A^2} \quad (14.19)$$

Mărimile care se calculează

a) Se calculează armonicile de curent  $I_v$  injectate de curenții deformanți.

$$I_v = n_v [\%] I_{1def} \quad (14.20)$$

$$I_{1def} = \frac{S_{def}}{\sqrt{3} \cdot U_A} \quad (14.21)$$

b) Se calculează reziduul deformant și coeficientul de distorsiune al curenților armonici injectați:

$$I_{rez} = \sqrt{\sum_{v=5}^{11} I_v^2} \quad (14.22)$$

$$\delta I_{def} = \frac{I_{rez}}{I_{1def}} 100 [\%] \quad (14.23)$$

c) Se calculează reactanța echivalentă a celor trei elemente în paralel (sistem, consumatori nedeformanți și bateria de condensatoare).

Reactanța bateriei de condensatoare pentru armonica  $v$  este dată de relația:

$$X_{BC} = -\frac{1}{C\omega} \quad (14.24)$$

$$X_{BCv} = -\frac{1}{C\omega v} \quad (14.25)$$

Se notează cu  $X_{ev}$  reactanța echivalentă a bateriei de condensatoare în paralel cu reactanța consumatorilor nedeformanți  $X_{ev}$ .

$$X_{ev} = \frac{-\frac{1}{C\omega v} \cdot X_1 \cdot v}{-\frac{1}{C\omega v} + X_1 \cdot v} = \frac{-\frac{1}{C\omega} \cdot X_1 \cdot v}{-\frac{1}{C\omega} + X_1 \cdot v^2} = \frac{X_1 \cdot v}{1 - C\omega \cdot X_1 \cdot v^2} \quad (14.26)$$

Se notează cu  $X_{v\text{ final}}$  reactanța echivalentă finală corespunzătoare reactanței  $X_{ev}$  în paralel cu  $X_{Sv}$ .

$$X_{v\text{ final}} = \frac{X_{ev} \cdot X_{Sv}}{X_{ev} + X_{Sv}} \quad (14.27)$$

d) Se calculează căderile de tensiune ale curenților armonici  $I_v$  pe reactanța finală  $X_{v\text{ final}}$  și se determină astfel armonicile de tensiune la bara A.



$$\Delta U_v = U_v = \sqrt{3} \cdot I_v \cdot X_{v\text{final}} \quad (14.28)$$

e) Se calculează pentru armonicile de tensiune de la bara A reziduul deformant și coeficientul de distorsiune.

$$U_{\text{Arez}} = \sqrt{\sum_{v=5}^{11} U_v^2} \quad (14.29)$$

$v=5; 7; 11$

$$\delta U_{\text{Adef}} = \frac{U_{\text{Arez}}}{U_{1A}} \cdot 100 [\%] \quad (14.30)$$

În majoritatea cazurilor coeficientul de distorsiune al tensiunii de la bara A va fi mai mare decât 5%.

$$\delta U_{\text{Adef}} > 5\%$$

Rezultă că se impun măsuri de atenuare a regimului deformant.

f) Se calculează și armonicile de curent care circulă prin bateria de condensatoare.

$$I_{Cv} = \frac{U_v}{\sqrt{3} \cdot X_{BCv}} = \frac{U_v}{\sqrt{3}} \cdot C\omega v \quad (14.31)$$

### 14.3.3. Măsuri ce se iau pentru atenuarea regimului deformant

Măsura cea mai eficientă care se ia pentru atenuarea regimului deformant constă în montarea unor filtre (F) realizate din circuite serie formate din bobine și condensatoare.

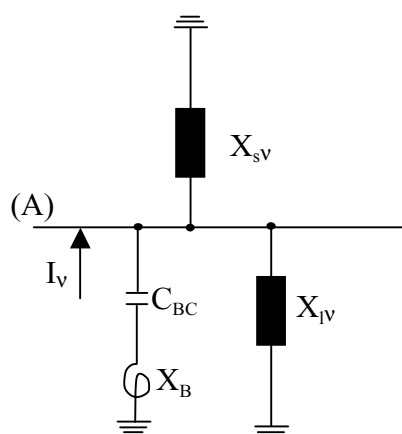


Fig.14.9. Schema echivalentă pentru atenuarea regimului deformant

Aceste filtre se realizează cu ajutorul bateriilor de condensatoare ce se folosesc pentru ameliorarea factorului de putere. Filtrele sunt aduse la frecvența de rezonanță pe frecvența uneia sau a mai multor armonici, prin aceasta ajungând la

reducerea coeficientului de distorsiune al tensiunii în nodurile în care se montează sub 5%.

Deci se poate scrie:

$$X_B \cdot v_{rez} - \frac{1}{C\omega v_{rez}} = 0 \quad (14.32)$$

În felul acesta, din condiția de rezonanță se determină reactanța bobinei.

$$X_B = \frac{1}{C\omega v_{rez}^2} \quad (14.33)$$

$v_{rez}$  = ordinul armonicii pe care este rezonant filtrul.

Intrucât unui astfel de filtru rezonant pe armonica de ordinul  $v_{rez}$  i se aplică și alte armonici de tensiune  $U_v$  al căror ordin  $v$  diferă de  $v_{rez}$  astfel:

$$v \geq v_{rez},$$

filtrul se comportă diferit în funcție de semnul expresiei:

$$E = X_B \left( v - \frac{v_{rez}^2}{v} \right) \quad (14.34)$$

Astfel:

- pentru armonici de ordinul  $v < v_{rez}$  expresia  $E < 0$  și filtrul se comportă ca o capacitate injectând curenți armonici în nod;
- pentru armonici de ordinul  $v > v_{rez}$  expresia  $E > 0$  și filtrul se comportă ca o inductanță absorbind curenți armonici din nod;

Pentru  $v \neq v_{rez}$  se poate determina reactanța filtrului.

$$X_{Fv} = X_B \cdot v - \frac{1}{C\omega v} \quad (14.35)$$

*Mărimile care se calculează:*

a) Se calculează armonicile de tensiune la bara A prin metodologia de calcul prezentă la punctul 14.3.2.

b) Se observă care este armonica de tensiune cea mai mică (de ordinul cel mai mic) și cu ponderea cea mai mare.

Se aduce filtrul la rezonanță pe această armonică.

Se calculează reactanța bobinei.

$$X_B = \frac{1}{C\omega v_{rez}^2} \quad (14.36)$$

c) Se calculează apoi reactanța filtrului.

$$X_{Fv} = X_B \cdot v - \frac{1}{C\omega v} \quad (14.37)$$

d) Se calculează apoi reactanța echivalentă a celor trei reactanțe în paralel: sistem, consumatori nedeformanți și filtru folosind expresii de tipul celor prezentate anterior la punctul 14.3.2.

Se calculează deci  $X_{v\text{final}}^{(F)}$ .

e) Se calculează apoi cu ajutorul armonicilor de curent injectate de consumatorii deformanți, care rămân constante, căderile de tensiune pe reactanța finală  $X_{v\text{final}}^{(F)}$  determinându-se armonicile de tensiune la bara A.

$$\Delta U_v = U_v = \sqrt{3} I_v \cdot X_{v\text{final}}^{(F)} \quad (14.38)$$

De remarcat că armonica de tensiune, căderea de tensiune pe reactanța finală, pentru care este rezonant filtrul este zero.

f) Se calculează pentru armonicile de tensiune reziduul de tensiune și coeficientul de distorsiune.

$$U_{\text{Arez}} = \sqrt{\sum_{v=5}^{11} U_v^2} \quad (14.39)$$

$$\delta U_{\text{Adef}} = \frac{U_{\text{Arez}}}{U_{1A}} \cdot 100 [\%] \quad (14.40)$$

Dacă  $\delta U_{\text{A def}}$  (este vorba de coeficientul de distorsiune al armonicilor de tensiune) este mai mic decât 5%, situația poate rămâne definitivă. Dacă nu, se împarte bateria de condensatoare în două trepte realizându-se două filtre care să fie rezonante pe armonica dinainte, iar celălalt pe o armonică superioară. Se procedează în acest mod până când:  $\delta U_{\text{A def}} < 5\%$ .

g) Se calculează apoi armonicile de curent care circulă prin filtru, făcându-se mențiunea că se consideră absorbită de întregul filtru, armonica de curent pe a cărui frecvență este rezonant filtrul.

$$I_{vF} = \frac{U_{vA}}{\sqrt{3} X_{Fv}} \quad (14.41)$$

## 14.3.4. Efectele regimului deformant

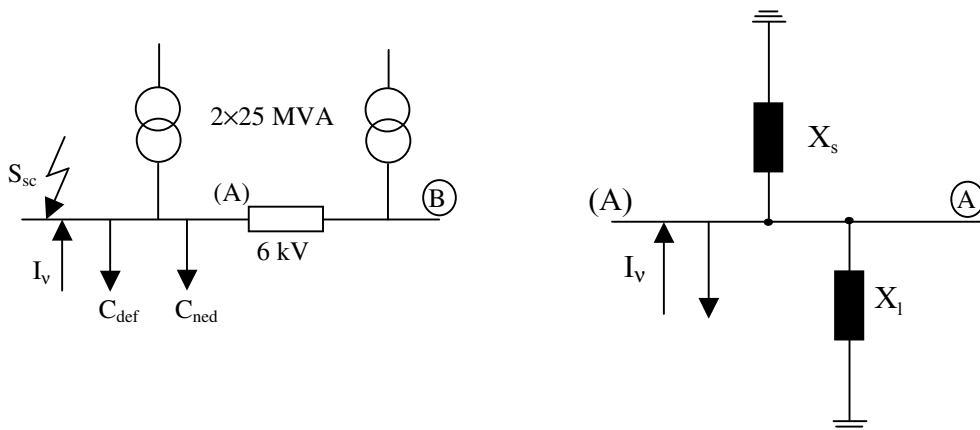
Regimurile deformante sunt caracterizate de următoarele efecte negative:

- majorarea pierderilor de putere în rețele;
- cupluri parazite în mașinile electrice;
- erori la aparatele de măsură și control;
- fenomene de rezonanță armonică având drept efect perturbații în rețelele de telecomunicații.

## Aplicații

1. Se consideră o stație de transformare de 110/6 kV de tip racord adânc din cadrul unei întreprinderi industriale, echipată cu două transformatoare de 25 MVA fiecare. La secția A de bare sunt racordați consumatori nedeformanți ( $C_{ned}$ ) care necesită o putere de 4 MVA cu  $\cos\varphi_{natural}=0,63$  și consumatori deformanți  $C_{def}$ , care necesită o putere de 6 MVA cu  $\cos\varphi_{natural}=0,63$ .

Se cere să se determine mărimile caracteristice ale regimului deformant pentru situația de funcționare dată.



## Rezolvare

a) Se calculează reactanțele necesare întocmirii schemei echivalente.

- Reactanța sistemului raportată la tensiunea de 6 kV.

$$X_S = \frac{U_n^2}{S_{sc}} = \frac{6^2}{150} = 0,24 \Omega$$

- Reactanța consumatorilor nedeformanți  $X_1$

$$X_1 = \frac{U_A^2}{S_{cned}} = \frac{U_A^2}{S_{cned} \cdot \sin\varphi_{natural}} = \frac{6,3^2}{4 \cdot 0,77} = 12,89 \Omega$$

b) Se calculează curenții consumatorilor deformanți:

- curentul fundamental (pentru  $f=50$  Hz)

$$I_1 = \frac{S_{\text{def}}}{\sqrt{3}U_A} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 550,5 \text{ A}$$

- curenții armonici

$$I_5 = 12\% (I_1) = 12 \cdot \frac{550,5}{100} = 66,06 \text{ A}$$

$$I_7 = 8\% (I_1) = 8 \cdot \frac{550,5}{100} = 44,04 \text{ A}$$

$$I_{11} = 3\% (I_1) = 3 \cdot \frac{550,5}{100} = 16,52 \text{ A}$$

c) Se calculează reziduul deformant al curentului consumatorilor deformanți.

$$I_{\text{rez}} = \sqrt{\sum_{v=2}^n I_v^2}$$

$$I_{\text{rez}} = \sqrt{(66,06)^2 + (44,04)^2 + (16,52)^2} = 81,09 \text{ A}$$

d) Se calculează coeficientul de distorsiune al curentului consumatorilor deformanți.

$$\delta I_{\text{def}} = \frac{I_{\text{rez}}}{I_{1\text{def}}} \cdot 100 [\%]$$

$$\delta I_{\text{def}} = \frac{81,09}{550,5} \cdot 100 = 14,73\%$$

e) Se determină repartizarea curenților armonici spre sistem.

$$I_{vs} = I_v \cdot \frac{X_{lv}}{X_{lv} + X_{sv}}$$

$$I_{5s} = 66,06 \cdot \frac{12,89}{12,89 + 0,24} = 64,85 \text{ A}$$

$$I_{7s} = 44,04 \cdot \frac{12,89}{12,89 + 0,24} = 43,16 \text{ A}$$

$$I_{11s} = 16,52 \cdot \frac{12,89}{12,89 + 0,24} = 16,19 \text{ A}$$

Se constată că 98% din curenții armonici circulă spre sistemul energetic și numai 2% spre consumatorii nedeformanți locali, adică influența acestora este foarte mică.

f) Se calculează tensiunile armonice la secția A.

$$\Delta U_{Av} = \sqrt{3} \cdot I_{vs} \cdot X_s \cdot v$$

$$\Delta U_{A5} = \sqrt{3} \cdot 64,85 \cdot 0,24 \cdot 5 = 134,63 \text{ V}$$

$$\Delta U_{A7} = \sqrt{3} \cdot 43,16 \cdot 0,24 \cdot 7 = 125,44 \text{ V}$$

$$\Delta U_{A11} = \sqrt{3} \cdot 16,19 \cdot 0,24 \cdot 11 = 73,94 \text{ V}$$

Reziduul deformant al tensiunii:

$$U_{\text{Arez}} = \sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}$$

$$U_{\text{Arez}} = \sqrt{134,63^2 + 125,44^2 + 73,94^2} = 198,31 \text{ V}$$

Coefficientul de distorsiune al tensiunii  $U_A$ :

$$\delta U_A = \frac{U_{\text{Arez}}}{U_{1A}} \cdot 100 = \frac{198,31}{6300} \cdot 100 = 3,15\%$$

Valoarea efectivă a tensiunii  $U_A$  deformată:

$$U_{\text{Adef}} = \sqrt{\sum_{v=1}^n U_v^2}$$

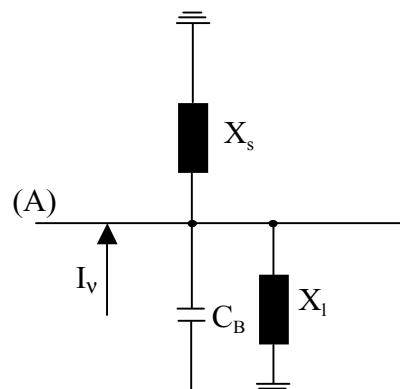
$$\delta U_{\text{Adef}} = \sqrt{6300^2 + 134,63^2 + 125,44^2 + 73,94^2} = 6303,9 \text{ V}$$

Rezultă:  $\delta U_A < 5\%$

Nu este necesar să se ia nici o măsură.

2. Se consideră că la secția de bare A a stației de 110/6 kV din aplicația precedentă, în condițiile examinate, se montează o baterie de condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere pentru ambele categorii de consumatori (deformanți și nedeformanți) până la valoarea neutrală (0,93).

Să se examineze influența acestei baterii asupra regimului deformant de la această secție de bare.



a) Determinarea puterii bateriei de condensatoare

$$S_{\text{total}} = S_{\text{ned}} + S_{\text{def}} = 4 + 6 = 10 \text{ MVA}$$

$$P_{\text{total}} = S_{\text{total}} \cdot \cos \varphi_{\text{natural}} = 10 \cdot 0,63 = 6,3 \text{ MW}$$

$$Q_B = P_{\text{total}} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{natural}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{neutral}}) = 5,17 \text{ MVAR}$$

$$Q_B = \frac{U_A^2}{X_B} = \frac{U_A^2}{\frac{1}{C\omega}} = U_A^2 C \omega$$

$$\text{Rezultă: } C = \frac{Q_B}{U_A^2 C \omega} = \frac{5170}{6,3 \cdot 314} = 4,15 \cdot 10^{-4} \text{ F}$$

Curentul produs de baterie pe fundamentală.

$$I_B = \frac{U_A}{\sqrt{3} X_B} = \frac{U_A C \cdot \omega}{\sqrt{3}} = \frac{Q_B}{\sqrt{3} U_A} = \frac{5170}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 474,36 \text{ A}$$

b) Calculul reactanțelor din schema echivalentă

1. Reactanța capacitivă a bateriei de condensatoare

$$X_C = -\frac{1}{C_B \cdot \omega} = \frac{1}{4,15 \cdot 10^{-4} \cdot 314} = -7,67 \Omega$$

2. Reactanța echivalentă pentru fundamentală

$$v=1$$

$$X_{C(1)} = \frac{-X_C \cdot X_1 \cdot v}{-X_C + X_1 \cdot v^2} = \frac{-7,67 \cdot 12,89}{-7,67 + 12,89} = -18,94 \Omega$$

3. Reactanța echivalentă pentru armonica 5 ( $v=5$ )

$$X_{C(5)} = \frac{-7,67 \cdot 12,89 \cdot 5}{-7,67 + 12,89 \cdot 5^2} = -1,57 \Omega$$

4. Reactanța echivalentă pentru armonica 7 ( $v=7$ )

$$X_{C(7)} = \frac{-7,67 \cdot 12,89 \cdot 7}{-7,67 \cdot 12,89 \cdot 7^2} = -1,11 \Omega$$

5. Reactanța echivalentă pentru armonica 11 ( $v=11$ )

$$X_{C(11)} = \frac{-7,67 \cdot 12,89 \cdot 11}{-7,67 \cdot 12,89 \cdot 11^2} = -0,7 \Omega$$

c) Calculul reactanțelor echivalente  $X_{ev}^{(1)}$  corespunzător reactanței sistemului  $X_s$  și reactanței echivalente  $X_{ev}$ .

$$X_{ev}^{(1)} = \frac{X_{sv} \cdot X_{ev}}{X_{sv} + X_{ev}}$$

Pentru fundamentală:

$$X_{e1}^{(1)} = \frac{-18,94 \cdot 0,24}{-18,94 + 0,24} = 0,24 \Omega$$

$$X_{e5}^{(1)} = \frac{-18,94 \cdot 0,24 \cdot 5}{-18,94 + 0,24 \cdot 5} = 5,09 \Omega$$

$$X_{e7}^{(1)} = \frac{-1,1 \cdot 0,24 \cdot 7}{-1,1 - 0,24 \cdot 7} = -3,27 \Omega$$

$$X_{e11}^{(1)} = \frac{-0,7 \cdot 0,24 \cdot 11}{-0,7 + 0,24 \cdot 11} = -0,95 \Omega$$

d) Calculul armonicilor de tensiune la bara A se efectuează cu expresia:

$$\Delta U_v = \sqrt{3} \cdot I_v \cdot X_{ev}^{(1)}$$

$$\Delta U_5 = \sqrt{3} \cdot 66,06 \cdot 5,09 = 581,7 \text{ V}$$

$$\Delta U_7 = -\sqrt{3} \cdot 44,04 \cdot 3,27 = -249,14 \text{ V}$$

$$\Delta U_{11} = -\sqrt{3} \cdot 16,52 \cdot 0,95 = -27,15 \text{ V}$$

Reziduul deformant al tensiunii  $U_A$ :

$$U_{Arez} = \sqrt{(581,7)^2 + (249,14)^2 + (27,15)^2} = 633,39 \text{ V}$$

$$\delta U_A = \frac{633,39}{6300} \cdot 100 = 10,05\%$$

Valoarea efectivă a tensiunii deformate:

$$U_A = \sqrt{\sum_{v=1}^n U_v^2} = \sqrt{6300^2 + 581,7^2 + 249,14^2 + 27,15^2} = 6332,55 \text{ V}$$

Rezultă că, bateria de condensatoare contribuie la amplificarea regimului deformant.



c. Calculul armonicilor de curent prin bateria de condensatoare se face cu expresia:

$$I_{cv} = \frac{U_v}{\sqrt{3}} \cdot C\omega v$$

$$I_{c5} = \frac{581,7}{\sqrt{3}} \cdot 4,51 \cdot 314 \cdot 10^{-4} \cdot 5 = 238,08 \text{ A}$$

$$I_{c7} = \frac{-249,14}{\sqrt{3}} \cdot 4,51 \cdot 314 \cdot 10^{-4} \cdot 7 = -142,76 \text{ A}$$

$$I_{c11} = \frac{-27,15}{\sqrt{3}} \cdot 4,51 \cdot 314 \cdot 10^{-4} \cdot 11 = -24,45 \text{ A}$$

$$I_B = 474,36 \text{ A}$$

Rezultă curentul produs de baterie pe fundamentală:

$$I_{Brez} = \sqrt{(238,08)^2 + (142,76)^2 + (24,45)^2} = 278,68 \text{ A}$$

$$\delta I_B = 58,75\% = \frac{278,68}{474,36}$$

Valoarea efectivă a curentului deformant al bateriei.

$$I_{Bdef} = \sqrt{(474,36)^2 + (238,08)^2 + (142,76)^2 + (24,45)^2} = 550,16 \text{ A}$$

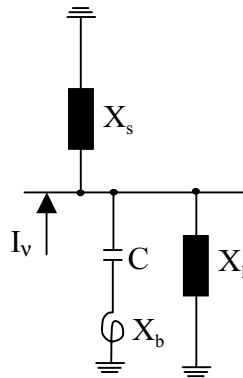
Bateria de condensatoare este supraîncărcată, valoarea efectivă a curentului deformant fiind cu 16% mai mare decât cea corespunzătoare unei fundamentale, adică regimul sinusoidal nedeformat, ceea ce face necesară luarea unor măsuri.

### Aplicația 3

Să examineze posibilitățile de atenuare a regimului deformant rezultat în aplicația anterioară datorită efectului bateriei de condensatoare necesare pentru îmbunătățirea factorului de putere și să se stabilească măsurile necesare în vederea reducerii coeficientului de distorsiune al tensiunii  $U_A$  sub 5%.

### Rezolvare

Întrucât armonica de ordinul cel mai mic și cu ponderea cea mai mare este armonica de ordinul 5, se consideră realizarea filtrului pentru această armonică.



Se determină reactanța bobinei din expresia:

$$X_b v_{\text{rez}} - \frac{1}{C\omega_{\text{rez}}} = 0$$

a) *Determinarea caracteristicilor filtrului*

$$X_b = \frac{1}{4,15 \cdot 10^{-4} \cdot 314 \cdot 5^2} = 0,31 \Omega$$

Pentru celelalte armonici reactanțele se calculează cu expresia:

$$X_{Fv} = X_b v - \frac{1}{C\omega v}$$

$$X_{F7} = 0,31 \cdot 7 - \frac{1}{4,15 \cdot 10^{-4} \cdot 314 \cdot 7} = 1,07 \Omega$$

$$X_{F11} = 0,31 \cdot 11 - \frac{1}{4,15 \cdot 10^{-4} \cdot 314 \cdot 11} = 2,71 \Omega$$

Reactanța filtrului pentru fundamentală:

$$X_{F1} = 0,31 - \frac{1}{4,15 \cdot 10^{-4} \cdot 314} = -7,36 \Omega$$

b) *Repartizarea curenților armonici produși de consumatorii deformanți între sistemul energetic și filtrul F5*

Din prima aplicație avem:

$$I_5 = 66,06 \text{ A}; I_7 = 44,04 \text{ A}; I_{11} = 16,52 \text{ A}$$

Pentru calculul circulației armonicilor de curent în situația realizării filtrului pentru armonica 5 se calculează reactanțele echivalente corespunzătoare filtrului și

sistemului neglijându-se reactanța consumatorilor locali nedeformați, care este mare în raport cu cele menționate.

Pentru armonica 5, întrucât reactanța filtrului este zero din condiția de rezonanță a acestuia, rezultă că și reactanța echivalentă, considerându-se reactanța sistemului în paralel cu aceasta este de asemenea zero.

Pentru armonica 7 avem:

$$X_e = \frac{X_s \cdot v \cdot X_F}{X_s \cdot v + X_F}$$

$$X_{e7} = \frac{0,24 \cdot 7 \cdot 1,07}{1,07 + 0,24 \cdot 7} = 0,65 \Omega$$

$$X_{e11} = \frac{0,24 \cdot 11 \cdot 2,71}{2,71 + 0,24 \cdot 11} = 1,34 \Omega$$

*c) Determinarea armonicilor de tensiune pentru bara A*

Se calculează căderile de tensiune pe reactanța echivalentă pentru fiecare armonică.

Pentru armonica 5:  $X_{e5}=0$  rezultă  $\Delta U_{5(A)}=0$

Pentru armonica 7:  $\Delta U_v = \sqrt{3} \cdot X_e \cdot I_v$

$$\Delta U_{7(A)} = \sqrt{3} \cdot 0,65 \cdot 44,04 = 49,52 \text{ V}$$

$$\Delta U_{11(A)} = \sqrt{3} \cdot 1,34 \cdot 16,52 = 38,30 \text{ V}$$

*d) Caracteristicile deformante ale tensiunii  $U_A$  sunt:*

$$U_{\text{Arez}} = \sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2} = \sqrt{49,52^2 + 38,3^2} = 62,60 \text{ V}$$

$$\delta U_{\text{Adef}} = \frac{U_{\text{Arez}}}{U_{1A}} \cdot 100 = \frac{62,6}{6300} \cdot 100 = 0,99\%$$

$$U_{\text{Adef}} = \sqrt{6300^2 + 49,52^2 + 38,30^2} = 6301,10 \text{ V}$$

*e) Calculul armonicilor de curent care circulă prin filtru*

$$I_{F(5)_1} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X_{F(1)}} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 736} = 494,79 \text{ A}$$

Pentru armonica 5 curentul minim care circulă prin filtru este cel produs de consumatorii deformanți:

$$I_5 = 66,06 \text{ A}$$

Pentru armonica 7 avem:

$$I_{F5(7)} = \frac{49,52}{\sqrt{3} \cdot 1,07} = 26,75 \text{ A}$$

Pentru armonica 11 avem:

$$I_{F5(11)} = \frac{38,30}{\sqrt{3} \cdot 2,71} = 8,17 \text{ A}$$

Reziduul deformant al curentului filtrului

$$\delta I_{F5} = \frac{71,74}{494,79} \cdot 100 = 14,5\%$$

Valoarea efectivă a curentului deformat al filtrului.

$$I_{F5\text{def}} = \sqrt{494,79^2 + 66,06^2 + 26,75^2 + 8,17^2} = 499,96 \approx 500 \text{ A}$$