

REGLAREA TENSIUNII ÎN REȚELELE ELECTRICE

1. Obiectivele lucrării

Considerată, până nu demult, doar un *serviciu* oferit consumatorilor de către unitățile furnizoare, energia electrică începe să fie privită tot mai mult ca o *marfă*, căreia i se impun, ca oricărui alt produs, anumiți parametri de calitate, pentru a satisface optim cerințele consumatorilor. Energia electrică livrată într-un anumit punct al unei rețele trifazate de c.a. este caracterizată de următorii parametri de calitate:

- *tensiunea de alimentare;*
- *frecvența;*
- *gradul de nesimetrie a sistemului trifazat de tensiuni;*
- *gradul de deformare a undei de tensiune;*
- *continuitatea în alimentare.*

În cadrul acestei lucrări, se analizează și se experimentează, pe modelul fizic existent în laborator, diversele metode de reglare a tensiunii, folosite la exploatarea rețelelor electrice, din punct de vedere funcțional și al eficacității lor.

2. Considerații de ordin teoretic

Nivelul de tensiune în diferite noduri ale rețelelor electrice depinde de condițiile de funcționare a centralelor electrice, de încărcarea cu putere activă și reactivă a acestora, de tranzitul de puteri active și reactive pe elementele rețelelor de transport și distribuție, precum și de mijloacele de reglare a tensiunii disponibile în sistemele de transport și distribuție a energiei electrice (transformatoare și autotransformatoare cu ploturi cu reglaj sub sarcină sau în absența sarcinii, compensatoare sincrone, baterii de condensatoare și bobine de reactanță). Variația tensiunii în plus sau în minus față de valoarea nominală, așa cum se va arăta în continuare, are consecințe negative atât asupra funcționării normale a consumatorilor, cât și asupra rețelei electrice. Din acest motiv, în principiu, scopul reglării tensiunii în rețelele electrice constă în menținerea variațiilor de tensiune între anumite limite impuse.

2.1 Cauzele și natura variațiilor de tensiune în rețelele electrice

Valoarea complexă a tensiunii în diferite noduri ale rețelelor electrice de transport și distribuție reprezintă un parametru de regim variabil în *spațiu* și *timp*.

Variația în spațiu se datorează căderilor de tensiune provocate de circulația puterilor active și reactive pe elementele componente ale rețelelor electrice (linii aeriene și în cablu, transformatoare, autotransformatoare etc.).

Se consideră, pentru exemplificare, un element de rețea (linie sau transformator), prin care se tranzitează o putere activă și respectiv reactivă $P + jQ$. În schema echivalentă monofazată, elementul de rețea este reprezentat numai prin impedanța lui longitudinală $\underline{Z} = R + jX$, conform celor reprezentate în Figura 1.

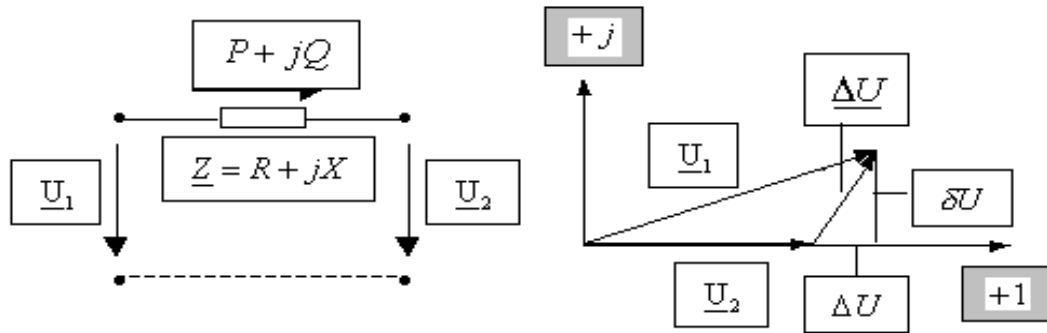


Figura 1 Componentele căderii de tensiune pe impedanța longitudinală a unui element de rețea (linie, transformator)

Căderea de tensiune complexă sau fazorială care apare pe elementul de rețea considerat, datorită circulațiilor de putere activă și reactivă, are următoarea formă:

$$\underline{\Delta U} = \Delta U + j\delta U = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 \frac{PR - QX}{U_2} + j \frac{PX - QR}{U_2} \quad (1)$$

în care:

ΔU – **componenta longitudinală a căderii de tensiune complexe**, a cărei valoare aproximează, cu suficientă precizie, diferența dintre modulele tensiunilor nodurilor:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{PR + QX}{U_2} \approx \frac{PR + QX}{U_n} \quad (2)$$

δU – **componenta transversală a căderii de tensiune complexe** care determină, în principal, valoarea unghiului de defazaj θ dintre tensiunile celor două noduri:

$$\delta U = \frac{PX - QR}{U_2} \approx \frac{PX - QR}{U_n} \quad (3)$$

$$\theta = \arcsin \frac{\delta U}{U_1} \approx \arcsin \frac{PX - QR}{U_n^2} \quad (4)$$

Ținând seama că impedanțele longitudinale ale majorității elementelor care compun rețelele electrice (linii electrice aeriene, transformatoare de putere) se caracterizează prin valori mult mai mici ale rezistenței în comparație cu reactanța inductivă ($R \ll X$), din relațiile (2) și (4) rezultă următoarele expresii aproximative pentru evaluarea componentei longitudinale a căderii de tensiune ΔU , precum și a defazajului θ dintre tensiunile nodurilor:

$$\Delta U \approx \frac{QX}{U_n} \quad (5)$$

$$\theta \approx \arcsin \frac{PX}{U_n^2} \quad (6)$$

Analiza expresiilor aproximative a componentei longitudinale a căderii de tensiune ΔU și a defazajului θ (5) și (6) pune în evidență următoarele aspecte importante privind reglarea tensiunii în rețelele electrice care aparțin sistemului electroenergetic și anume:

- nivelul tensiunilor în nodurile rețelelor electrice este determinat, cu precădere, de circulația puterilor reactive pe elementele componente ale acestor rețele;
- defazajul dintre tensiunile nodurilor rețelelor electrice depinde, în principal, de circulațiile de putere activă pe elementele componente ale rețelelor electrice.

Având în vedere că prin procesul de reglare a tensiunii în rețelele electrice se urmărește modificarea valorii și nu a fazei acesteia, atenția principală este îndreptată asupra circulațiilor de putere reactivă.

Variațiile în timp ale tensiunii din nodurile rețelelor electrice sunt legate de variațiile în timp ale căderilor de tensiune. Acestea apar pe elementele componente ale rețelelor electrice, datorate modificării schemelor de funcționare ale acestora, precum și a modificării în timp a circulațiilor de putere activă și reactivă în elementele rețelelor de transport și distribuție, ca o consecință a variațiilor puterilor absorbite de consumatorii alimentați cu energie electrică, conform graficelor de sarcină activă și reactivă ale acestora și a puterilor generate în centralele electrice.

Din cele menționate, rezultă că tensiunea într-un nod al rețelei electrice este o funcție de timp $U(t)$, iar variația de tensiune procentuală în acest nod, la un moment dat t , denumită și **abatere** sau **deviație de tensiune**, se calculează cu o relație de forma:

$$\Delta U(t) = \frac{U(t) - U_n}{U_n} 100 \quad [\%] \quad (7)$$

Notând cu U_{max} și U_{min} valorile maxime și minime ale tensiunii într-un nod al rețelei electrice, pe un interval de timp T , atunci variația maximă de tensiune în nodul considerat este dată de următoarea relație:

$$\Delta U_{max} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_n} 100 \quad [\%] \quad (8)$$

Din punct de vedere al modului de producere a perturbațiilor care apar în rețelele electrice (perturbații de lungă durată, respectiv de scurtă durată) și de aspectul modificării în timp, variațiile de tensiune se pot clasifica astfel:

- **Variații lente de tensiune** care apar ca rezultat al suprapunerii unor variații *periodice* datorate modificării structurii și puterilor cerute de consumatori, între orele de vârf și cele de gol de sarcină sau între zilele lucrătoare și cele de repaus și a unor variații *aleatoare* apărute ca urmare a conectării sau deconectării de la rețea a unor consumatori.
- **Variații bruște de tensiune**, reprezentând variații de tensiune cu caracter repetitiv, *ciclice* sau *aleatoare*, care au loc cu un gradient $\Delta U/\Delta t$ mai mare de 1%. Acestea sunt provocate de funcționarea intermitentă a unor receptoare care produc șocuri de putere cu caracter pasager în rețea (la joasă tensiune – aparatele de sudură; la medie tensiune – pompele sau laminoarele; la înaltă tensiune – cuptoarele cu arc etc.), de modificarea schemelor de funcționare ale rețelelor electrice, de dispariții scurte ale tensiunii ca urmare a funcționării automatizărilor de sistem, cum ar fi instalațiile de anclanșare automată a rezervei (AAR) sau a celor de reanclanșare automată rapidă (RAR).
- **Goluri de tensiune**, reprezentând scăderi rapide ale tensiunii cu o durată foarte scurtă (cel mult 3 sec.), datorate unor perturbații trecătoare ce pot să apară în rețelele electrice, cum ar fi: scurtcircuite simetrice și nesimetrice, conectarea unor motoare electrice care absorb curenți mari la pornire etc.

În situația apariției unor perturbații de scurtă durată în funcționarea rețelelor electrice, care conduc la producerea unor variații bruște de tensiune în rețea sau a golurilor de tensiune, revenirea la valorile inițiale ale tensiunilor în nodurile rețelelor sau la valori apropiate de acestea se realizează practic prin dispariția cauzei perturbatoare, fie de la sine, fie cu ajutorul automatizărilor de sistem.

Limita de timp care desparte perturbațiile de scurtă durată (variații bruște sau goluri de tensiune) de cele de lungă durată (variații lente de tensiune) este, în general, timpul necesar protecțiilor, automatizărilor și echipamentelor de comutație pentru a restabili tensiunea normală în rețelele electrice, dacă acest lucru este posibil. În condițiile existente în țara noastră, se consideră această limită de separare ca fiind de trei secunde.

Perturbațiile de scurtă durată produse de modificările bruște și trecătoare ale impedanțelor transversale din rețelele electrice, ca urmare a scurtcircuitelor sau a punerilor la pământ apărute accidental în rețelele electrice (nesimetrii transversale), conduc la căderi ale tensiunilor care intră în **categoria golurilor de tensiune**.

În ceea ce privește perturbațiile de scurtă durată, provocate de modificările bruște și trecătoare ale impedanțelor longitudinale din rețelele electrice (nesimetrii longitudinale), care conduc practic la dispariții ale tensiunii, acestea fac parte din **categoria microîntreruperilor**.

Deoarece atât golurile de tensiune, cât și microîntreruperile apar în condițiile funcționării normale a instalațiilor de protecție și automatizare, prin care se previn întreruperile de durată în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor, prezența lor este considerată ca o stare care nu trebuie să perturbe funcționarea acestora.

Având în vedere cele menționate anterior, este necesar ca sistemul electroenergetic, în ansamblul său, să asigure ca aceste perturbații de lungă, respectiv scurtă durată, să aibă caracteristici cât mai ușor de suportat de către consumatorii alimentați cu energie electrică, iar în ceea ce privește consumatorii, aceștia trebuie să fie dotați cu instalații de utilizare cât mai insensibile la acest gen de fenomene, cum sunt variațiile de tensiune care apar inevitabil în rețelele electrice.

Rezultă, deci, că o singuranță mărită în funcționarea consumatorilor presupune o bună corelare între caracteristicile variațiilor de tensiune, de toate tipurile amintite, care apar în rețelele electrice din sistemul electroenergetic și performanțele tehnice ale instalațiilor de utilizare a energiei electrice.

2.2 Efectele variațiilor de tensiune

Pe baza aspectelor prezentate, rezultă că variațiile de tensiune în rețelele de distribuție care alimentează direct consumatori de energie electrică la medie sau joasă tensiune determină modificarea cantitativă și calitativă a producției, a randamentului instalațiilor, a uzurii echipamentului, precum și dereglarea proceselor tehnologice. Toate efectele amintite se reflectă în cheltuieli suplimentare sau daune economice produse diferitelor categorii de consumatori alimentați cu energie electrică, datorită calității necorespunzătoare a tensiunii în nodurile rețelor la care sunt racordați aceștia.

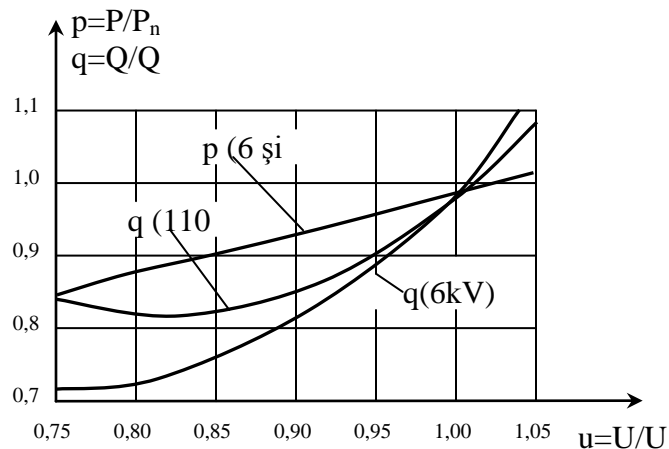


Figura 2 Caracteristicile statice de putere activă și reactivă ale unui consumator complex, în funcție de tensiunea sistemului de alimentare, în unități relative

De asemenea, variațiile de tensiune influențează, în același timp, și funcționarea rețelelor electrice de distribuție, prin modificarea circulațiilor de puteri active și reactive, precum și a pierderilor de putere și energie care apar în aceste rețele, datorate, în principal, modificării puterilor

absorbite de receptoarele electrice, conform caracteristicilor statice de putere ale sarcinilor $P_s(U)$ și $Q_s(U)$. De regulă, sarcinile alimentate cu energie electrică din nodurile rețelelor sunt consumatori complecși, având în structura lor motoare electrice, instalații de redresare, iluminat electric (lămpi cu incandescență, lămpi fluorescente etc), receptoare termice și altele, fapt care conduce la caracteristici statice neliniare de putere activă și reactivă, de tipul celor reprezentate în Figura 2. Totodată, în Figurile 3 și 4 sunt reprezentate curbele de variație ale puterilor active și reactive absorbite de sarcinile electrice, respectiv ale curentului care străbate sarcinile, în funcție de tensiunea aplicată la bornele acestora, exprimate în unități relative.

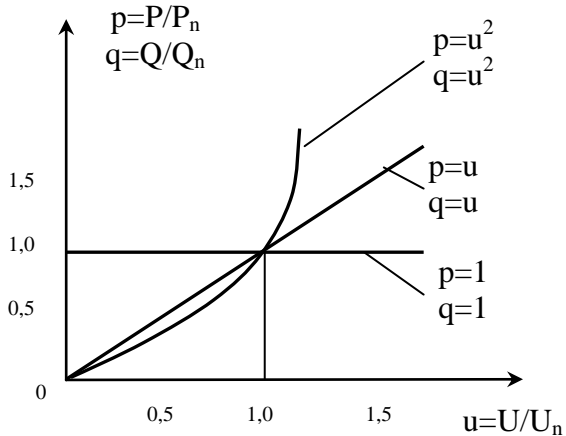


Figura 3 Curbele de variație ale puterilor active și reactive absorbite de sarcină, în funcție de tensiunea la borne, în unități relative

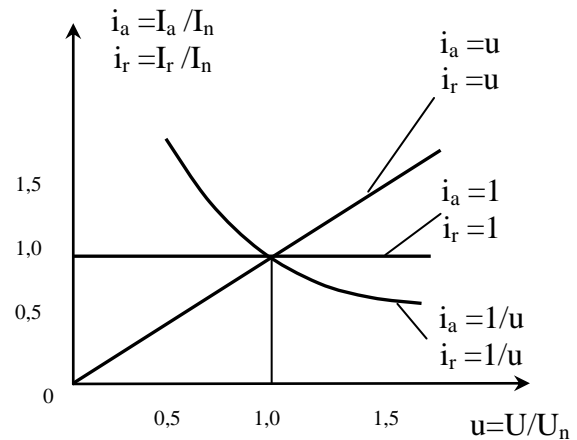


Figura 4 Curbele de variație ale curentului eficient care străbate sarcina, în funcție de tensiunea la borne, în unități relative

Cunoașterea caracteristicilor statice de putere activă și reactivă ale sarcinilor permite stabilirea valorilor derivatelor parțiale pentru aceste mărimi în raport cu tensiunea, $\frac{\partial P_s}{\partial U}$ și $\frac{\partial Q_s}{\partial U}$, care indică efectul de reglaj sau autoreglator al sarcinilor.

Semnificația acestui efect de reglaj al sarcinilor este următoarea:

- Dacă efectul de reglaj al sarcinii este pozitiv, adică $\frac{\partial P_s}{\partial U} > 0$ și $\frac{\partial Q_s}{\partial U} > 0$, rezultă că, la o modificare a tensiunii de alimentare într-un sens, atunci și puterea activă, respectiv reactivă absorbite de sarcină se modifică în același sens. Astfel, la o micșorare a tensiunii de alimentare, și puterea activă/reactivă absorbită de sarcină scade, ceea ce ușurează menținerea tensiunii în limite admisibile. Rezultă, deci, că valori pozitive și cât mai ridicate ale derivatelor parțiale respective determină condiții favorabile reglării tensiunii în rețelele electrice.

- Dacă efectul de reglaj al sarcinii este negativ ($\frac{\partial P_s}{\partial U} < 0$ și $\frac{\partial Q_s}{\partial U} < 0$), la o micșorare a tensiunii de alimentare, puterea activă și reactivă absorbite cresc, ceea ce va determina mărirea căderilor de tensiune care apar în rețeaua electrică, făcând și mai dificilă readucerea tensiunii în limite admisibile. În această situație, condițiile de reglare a tensiunii în rețelele electrice devin nefavorabile.

Pe baza considerentelor menționate anterior, în rețelele electrice de distribuție se preferă, din punct de vedere al procesului de **reglare a tensiunii**, consumatorii cu efect de reglaj pozitiv, de valoare cât mai mare. În rețelele de transport al energiei electrice de înaltă și foarte înaltă tensiune, nivelul de tensiune este impus, în principal, de izolația liniilor și a echipamentelor aferente. Funcționarea cu un nivel scăzut de tensiune conduce la următoarele efecte negative: creșterea pierderilor de putere activă, scăderea randamentului de transport al energiei electrice, micșorarea puterii de rupere a întrerupătoarelor, modificarea sensibilității unor aparate sau instalații care realizează protecția prin relee, înrăutățirea condițiilor de stabilitate etc.

La funcționarea cu un nivel de tensiune mai ridicat a liniilor de transport al energiei electrice, acesta este limitat de următoarele aspecte:

- nivelul de izolație al liniilor;
- riscul de reaprindere a arcului la întrerupătoare;
- supraîncărcarea unor elemente transversale:
 - baterii de condensatoare;
 - bobine de reactanță etc.
- posibilitatea amorsării descărcării corona pe liniile de transport de înaltă și foarte înaltă tensiune, însoțită de o serie întreagă de efecte negative:
 - pierderi suplimentare de putere activă transversale;
 - micșorarea randamentului de transport al liniilor electrice;
 - corodarea conductoarelor, armăturilor și clemelor;
 - micșorarea duratelor de viață a acestora și puternice perturbații radiofonice.

2.3 Metode de reglare a tensiunii în rețelele electrice

Metodele de reglare urmăresc menținerea tensiunii, în toate nodurile rețelelor de transport și ale sistemelor de distribuție a energiei electrice, la valori cât mai apropiate de valoarea nominală. Problema reglării tensiunii se pune, în principal, față de variațiile lente de tensiune, obiectivele prioritare urmărite fiind următoarele:

- ✓ menținerea unor nivele de tensiune cât mai bune la barele stațiilor de transformare și la consumatori;

- ✓ înregistrarea benzilor de variație a tensiunii și încadrarea lor în zona favorabilă;
- ✓ reducerea la minim a circulațiilor de putere reactivă, în special pe liniile de transport de înaltă și foarte înaltă tensiune;
- ✓ minimizarea pierderilor de putere în rețelele electrice de transport și distribuție a energiei electrice.

Analiza expresiei (1), care permite stabilirea căderilor complexe sau fazoriale de tensiune pe elementele componente ale rețelelor electrice, pune în evidență principalele procedee practice ce pot fi folosite la modificarea sau compensarea căderilor de tensiune care apar în rețelele electrice:

- Modificarea circulației de putere reactivă (Q).
- Modificarea parametrilor rețelei (R, X).
- Introducerea de tensiuni suplimentare.

2.3.1 Reglarea tensiunii în rețelele electrice prin modificarea circulației de putere reactivă

Modificarea circulației de putere reactivă este o metodă eficientă de reglare a tensiunii, deoarece acționează asupra cauzei variațiilor de tensiune care apar în rețelele electrice și anume circulațiile de putere reactivă. Aplicarea acestei metode, în practica de exploatare a rețelelor electrice, necesită existența unor instalații de compensare amplasate în nodurile rețelelor, care produc sau consumă putere reactivă.

Pentru a ilustra principiul de reglare a tensiunii prin modificarea circulației de putere reactivă, se consideră rețeaua simplă, a cărei schemă monofilară este reprezentată în Figura 5 a, unde un consumator este alimentat prin intermediul unei rețele de distribuție în configurație radială.

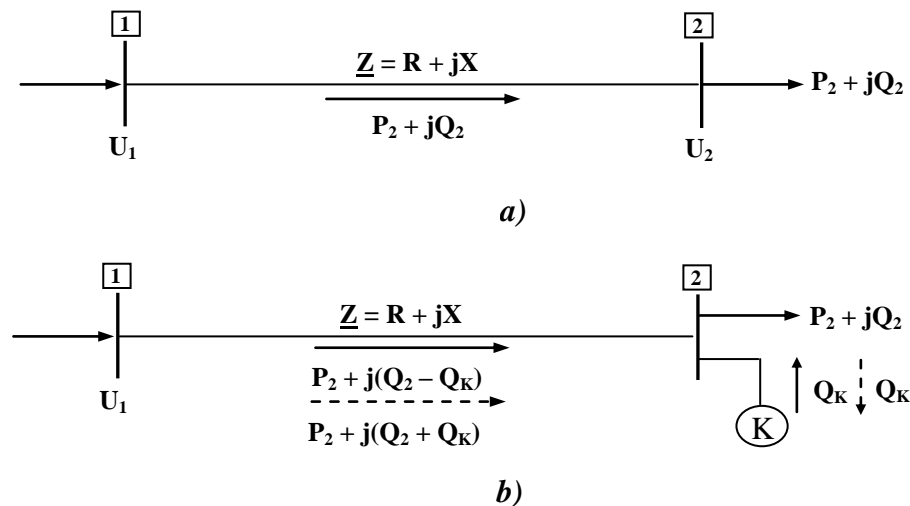


Figura 9.21 Compensarea puterii reactive la barele de alimentare ale unui consumator

În schema echivalentă monofazată, linia electrică este reprezentată numai prin impedanța ei longitudinală $\underline{Z} = R + jX$. Consumatorul de energie electrică este racordat pe barele 2 ale instalației și absoarbe din linia electrică o putere activă și respectiv reactivă constantă și anume $P_2 + jQ_2$.

Considerând tensiunea pe barele 1 ale instalației electrice ca fiind constantă ($U_1 = \text{const.}$), în toate regimurile de funcționare, nivelul de tensiune pe barele (2), de unde este alimentat cu energie electrică consumatorul, este dat de următoarea relație:

$$U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_n} \quad (9)$$

Dacă pe barele 2 se prevede o instalație de compensare K , conform celor reprezentate în Figura 5b, care furnizează o putere reactivă Q_K pe care o injectează în rețea, puterea reactivă transmisă prin linie scade de la valoarea Q_2 la valoarea $Q_2 - Q_K$, căderea de tensiune pe linie se micșorează ($\Delta U' < \Delta U$) și valoarea tensiunii pe barele 2 crește ($U_2' > U_2$), conform următoarei relații:

$$U_2' = U_1 - \Delta U' = U_1 - \frac{P_2 R + (Q_2 - Q_K) X}{U_n} \quad (10)$$

În cazul când instalația de compensare K absoarbe o putere reactivă Q_K din rețea, deci se comportă ca un consumator reactiv suplimentar, puterea reactivă transmisă prin linie crește de la valoarea Q_2 la valoarea $Q_2 + Q_K$, căderea de tensiune pe linie crește ($\Delta U'' > \Delta U$) și valoarea tensiunii pe barele 2 ale instalației se micșorează ($U_2'' < U_2$), conform relației următoare:

$$U_2'' = U_1 - \Delta U'' = U_1 - \frac{P_2 R + (Q_2 + Q_K) X}{U_n} \quad (11)$$

Din analiza relațiilor (9), (10) și (11) rezultă că prin modificarea, într-un sens sau altul, a puterii reactive transmise prin linie consumatorului, se poate controla tensiunea pe barele de alimentare ale acestuia și anume $U_2'' < U_2 < U_2'$.

Pentru compensarea puterii reactive în nodurile rețelelor electrice, în vederea reglării tensiunii, se folosesc două categorii de mijloace:

- **Compensatoare rotative:**
 - generatoare sincrone;
 - compensatoare sincrone și asincrone.
- **Compensatoare statice:**
 - baterii de condensatoare;
 - bobine de reactanță.

Generatoarele sincrone din centralele electrice furnizează o mare parte din puterea reactivă necesară funcționării în condiții normale și stabile a sistemului electroenergetic, în ansamblul său. Acestea își modifică puterea reactivă debitată, prin modificarea curentului de excitație.

Generatoarele de mare putere, conectate la noduri importante din sistemul electroenergetic, au un rol esențial la menținerea stabilității sistemului și a unui nivel de tensiune corespunzător în rețelele de transport al energiei electrice.

Generatoarele din centralele locale pot contribui, de asemenea, la reglarea tensiunii în sistemele de distribuție a energiei electrice, prin modificarea puterii reactive furnizate. Totodată, pot fi utilizate, în acest scop, generatoarele din centralele locale, care nu mai pot fi folosite pentru producerea energiei active, din cauza uzurii avansate a instalațiilor de cazane și turbine.

În regimurile de gol de sarcină sau sarcină minimă, se obișnuiește ca generatoarele din hidrocentrale să funcționeze subexcitate, pentru a absorbi puterea reactivă furnizată de liniile electrice din sistem.

Compensatoarele sincrone sunt motoare sincrone proiectate să funcționeze în gol, fără cuplu rezistent la arbore. Acestea absorb din rețeaua electrică o putere activă de valoare mică, necesară acoperirii pierderilor de mers în gol și pot genera sau consuma putere reactivă, conform regimului lor de excitație.

Pentru o anumită valoare I_{ex0} a curentului de excitație, puterea reactivă a compensatorului este nulă. În situația în care $I_{ex} > I_{ex0}$, compensatorul funcționează în regim supraexcitat și se comportă ca un condensator, adică debitează putere reactivă în rețeaua electrică. Dacă $I_{ex} < I_{ex0}$, compensatorul sincron funcționează în regim subexcitat și se comportă ca o bobină, adică absoarbe putere reactivă din rețeaua electrică.

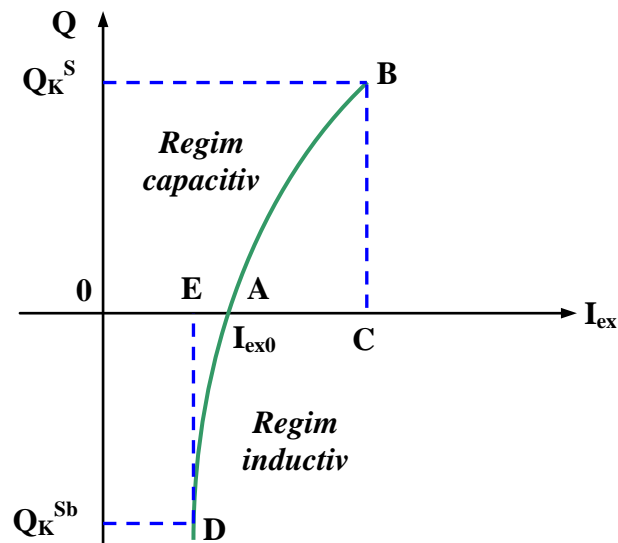


Figura 6 Variația puterii reactive a compensatorului sincron, în funcție de curentul de excitație

Variația puterii reactive a unui compensator sincron, în funcție de valoarea curentului de excitație, este reprezentată în Figura 6 Segmentul OA reprezintă curentul de excitație la mers în gol (I_{ex0}), iar segmentul OC corespunde curentului maxim de excitație în regim supraexcitat, când compensatorul sincron furnizează o putere reactivă capacitivă Q_K^S , corespunzătoare segmentului CB . Excitația minimă admisibilă este reprezentată în figură prin segmentul OE , căruia îi corespunde o putere reactivă inductivă Q_K^{Sb} , corespunzătoare segmentului DE .

Puterea reactivă a unui compensator sincron care funcționează în regim supraexcitat este limitată numai de condițiile de încălzire a acestuia, în timp ce la funcționarea în regim subexcitat, aceasta este limitată de condițiile de menținere a stabilității în funcționare.

Raportul dintre puterea maximă reactivă absorbită Q_K^{Sb} și puterea maximă furnizată Q_K^S depinde de construcția compensatorului sincron și de repartiția amperspirelor între stator și rotor. Criteriul optim de construcție a acestora corespunde următorului raport:

$$\frac{Q_K^{Sb}}{Q_K^S} = 0,5 \div 0,65 \quad (12)$$

iar costul compensatoarelor sincrone crește cu atât mai mult, cu cât puterea reactivă absorbită se apropie, ca valoare, de puterea reactivă furnizată.

Utilizarea compensatoarelor sincrone, în procesul de reglare a tensiunii în rețelele electrice, prezintă o serie de **avantaje**, cum ar fi:

- Posibilitatea funcționării atât ca generator, cât și ca receptor de putere reactivă.
- Reglarea continuă a puterii reactive generate sau absorbite, cu ajutorul curentului de excitație.
- Contribuie la menținerea stabilității sistemului, având un efect autoregulator pozitiv. În acest sens, scăderea tensiunii de alimentare a compensatoarelor sincrone conduce la creșterea puterii reactive furnizate de acestea.

O serie de **dezavantaje** limitează însă folosirea, pe scară tot mai largă, a compensatoarelor sincrone și anume:

- ❖ Pierderi de putere activă relativ ridicate, valorile acestor pierderi procentuale variind între $1,95 \div 5,6\%$. Aceste pierderi specifice sunt mai mari la compensatoarele sincrone de putere nominală mai mică sau în cazul funcționării lor cu o putere mai redusă față de puterea nominală.
- ❖ Cheltuieli de exploatare relativ ridicate și creșterea costului unității de putere reactivă instalată în compensatoarele sincrone odată cu scăderea puterii nominale a acestora.

Din aceste motive, utilizarea compensatoarelor sincrone de mică putere nu se justifică din punct de vedere economic, în procesul de reglare a tensiunii în rețelele electrice de distribuție. În sistemele electroenergetice moderne, prezintă interes compensatoarele sincrone a căror putere este de ordinul a zeci de MVA, instalate în stațiile importante din sistem, stații de transformare ce deservește zone cu deficit mare de putere reactivă. În sistemele de distribuție a energiei electrice, pentru reglarea tensiunii fiind necesare puteri mai mici, se dovedește economică și eficientă folosirea surselor de compensare statică și anume baterii de condensatoare și bobine de reactanță, fixe sau reglabile.

Compensatoarele asincrone sunt mașini asincrone prevăzute cu o excitație cu colector (de exemplu, un convertizor de frecvență), capabile să îndeplinească același rol ca și cel al unui compensator sincron. Inelele rotorului compensatorului asincron *A* sunt legate de colectorul excitatricei *B*, ale cărei inele sunt alimentate de la rețea prin intermediul unui organ de reglaj *C*, conform celor reprezentate în Figura 7.

Variația puterii reactive a unei mașini asincrone, în funcție de curentul de excitație, este reprezentată în Figura 8, în care segmentul *OA* corespunde curentului de mers în gol. În cazul compensatoarelor asincrone, puterea reactivă maximă pe care o pot absorbi este egală cu cea pe care o pot genera, aceasta fiind limitată numai de condițiile de încălzire ale mașinii.

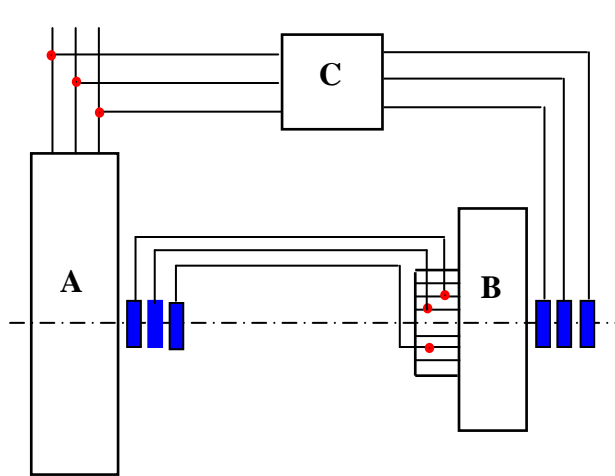


Figura 7 Schema de principiu a unei instalații de compensare cu mașină asincronă

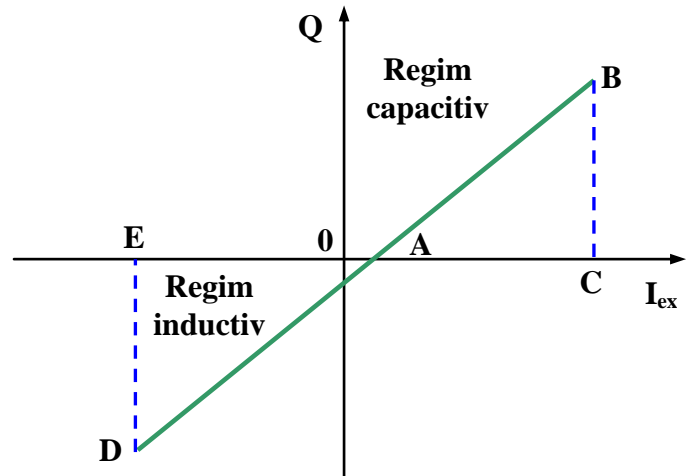


Figura 8 Variația puterii reactive a compensatorului asincron în funcție de curentul de excitație

Compensatoarele asincrone sunt mai puțin utilizate ca surse de compensare a puterii reactive, în procesul de reglare a tensiunii în rețelele electrice, deoarece prezintă o serie de dezavantaje în comparație cu compensatoarele sincrone și anume:

- ❖ Costul unității de putere reactivă instalată este mai mare.
- ❖ Pierderile specifice de putere activă sunt mai mari.

- ❖ Nu contribuie la menținerea stabilității în cazul apariției unor defecte în rețeaua electrică, deoarece scăderea tensiunii de alimentare conduce și la reducerea puterii generate de compensatorul asincron.
- ❖ Organele de reglaj și excitatricele compensatoarelor asincrone sunt mai pretențioase.

Bateriile de condensatoare montate în derivație formează o sursă principală de compensare a puterii reactive în sistemele de distribuție a energiei electrice, în scopul reglării tensiunii și a reducerii pierderilor de putere și energie activă. Elementele bateriilor de condensatoare se pot conecta în stea sau în triunghi, conform celor reprezentate în Figura 9.

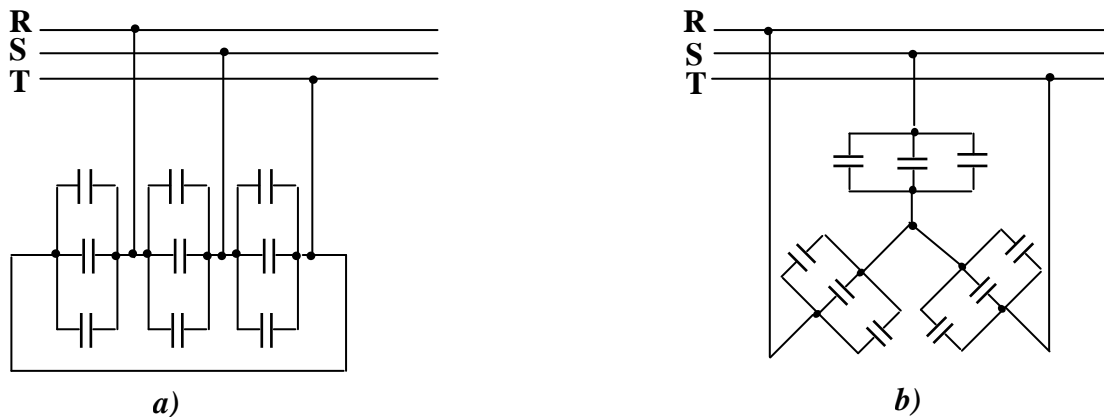


Figura 9 Scheme pentru montarea în derivație a condensatoarelor de compensare a puterii reactive într-o rețea electrică de distribuție:
a – conexiune în triunghi; b – conexiune în stea

Puterea reactivă debitată de o baterie de condensatoare montată în derivație este dată de următoarea relație:

$$Q_K = m\omega CU^2 \quad [\text{MVAr}] \quad (13)$$

unde:

U – tensiunea rețelei între faze, în kV;

C – capacitatea bateriei pe fază, în F;

m – coeficient cu valoarea 1, pentru conexiunea în stea și 3, pentru conexiunea în triunghi.

În situația folosirii lor pentru reglarea tensiunii în sistemul electroenergetic, bateriile de condensatoare se montează în derivație, conectate, de regulă, la înfășurarea terțiară a transformatoarelor care echipează stațiile de transformare de înaltă tensiune din rețelele de transport al energiei electrice. În vederea reglării tensiunii în nodurile sistemelor de distribuție a energiei electrice, bateriile de condensatoare pot fi amplasate pe barele de medie tensiune ale stațiilor de transformare coborâtoare sau pe barele de medie și joasă tensiune ale posturilor de transformare din rețelele de distribuție, precum și de-a lungul distribuitorilor de medie și joasă tensiune.

Modulele de condensatoare reglabile, folosite în practică pentru corecția automată a factorului de putere, precum și pentru reglarea tensiunii în rețelele electrice de distribuție, prezintă următoarele părți componente și performanțe:

- ✓ Set de trei siguranțe fuzibile.
- ✓ Contactoare pentru sarcini capacitive; durata minimă de viață de 10^5 acționări.
- ✓ Condensatoare monofazate conectate între ele, în vederea obținerii puterilor cerute pe trepte.
- ✓ Set de bare cu două seturi de câte trei izolatori, capabile să garanteze o protecție mecanică ridicată la forțele electrodinamice, în cazul apariției unor scurtcircuite.
- ✓ Regletă pentru conectarea ieșirilor regulatorului.
- ✓ Construcția rapidă și sigură a unităților de corecție automată.
- ✓ Posibilitatea de asamblare, una peste alta, a modulelor, prin interconectarea setului de bare.
- ✓ Regleta permite comanda fiecărui contactor individual sau comanda în cascadă a contactoarelor, permițând, în felul acesta, limitarea sarcinii pe contactele regulatorului și, de asemenea, solicitările pe rețeaua electrică.

Folosirea bateriilor de condensatoare drept surse de putere reactivă, în procesul de reglare a tensiunii în rețelele de distribuție, prezintă o serie de avantaje în comparație cu compensatoarele sincrone și anume:

- Valorile pierderilor de putere activă procentuale sunt mai mici: $0,25 \div 0,30\%$ din puterea nominală.
- Costul unității de putere reactivă depinde, într-o măsură mică, de puterea totală a bateriei de condensatoare.
- Posibilitatea realizării etapizate a investițiilor, prin extinderea în timp a bateriei cu noi elemente.
- Cheltuieli de exploatare reduse.

În ceea ce privește dezavantajele utilizării bateriilor de condensatoare în procesul de reglare a tensiunii, acestea sunt următoarele:

- ✓ Bateriile de condensatoare nu pot funcționa ca receptoare de putere reactivă și, de asemenea, nu permit reglarea continuă a tensiunii, aceasta putându-se realiza numai în trepte. Totuși, prin folosirea unor scheme adecvate de conexiuni, puterea debitată de o baterie de condensatoare se poate regla în trepte suficient de mici.

- ✓ Dependența puterii reactive debitate de bateria de condensatoare, de pătratul tensiunii de la bornele ei de alimentare, conform relației (9.34), reflectă un efect autoregulator negativ, ceea ce constituie un factor defavorabil atât pentru reglarea tensiunii, cât și pentru funcționarea stabilă a sistemului. Alimentarea bateriei de condensatoare printr-un autotransformator reglabil poate remedia această deficiență, în situația în care soluția respectivă se justifică din punct de vedere economic.

Bobinele de reactanță se conectează în derivație, direct la liniile de înaltă și foarte înaltă tensiune sau în înfășurarea terțiară a autotransformatoarelor, conform celor reprezentate în Figura 10, pentru a absorbi puterea capacitivă a liniilor de transport al energiei electrice, în regimurile de sarcină redusă sau în gol ale acestora, reducând astfel supratensiunile datorate circulațiilor curenților capacitivi.

Bobinele de reactanță se construiesc obișnuit cu miez de fier, prevăzută cu întrefier mare. Pot fi de construcție trifazată sau constituite din grupuri de câte trei bobine monofazate. Unul din procedeele cel mai des utilizat, pentru reglarea puterii reactive absorbite de bobinele de reactanță, constă în modificarea numărului de bobine grupate în paralel.

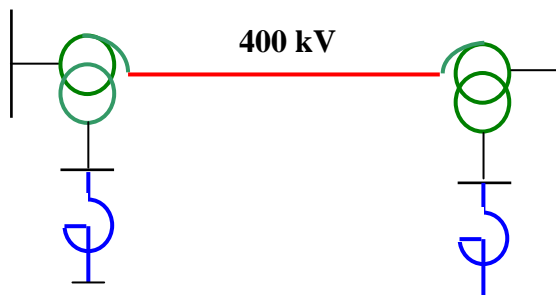


Figura 10 Exemplu de conectare a bobinelor de reactanță în liniile de transport de înaltă tensiune

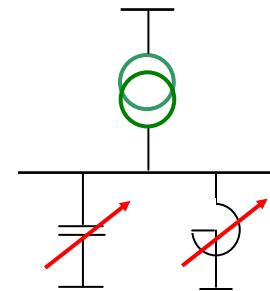


Figura 11 Sursă statică de putere reactivă formată din baterii de condensatoare și bobine de reactanță reglabile

Prin asocierea bateriilor de condensatoare cu bobine de reactanță reglabile, se pot realiza surse statice de compensare, de tipul celor reprezentate în Figura 11, care pot funcționa atât în regim capacitiv, cât și în regim inductiv. Asemenea instalații prezintă o comportare similară cu cea a compensatoarelor sincrone, puterea reactivă furnizată sau absorbită de instalație putând fi reglată în trepte sau continuu. Pentru reglarea continuă a puterii instalației, reglarea bobinei se realizează fie cu ajutorul unei înfășurări de premagnetizare în curent continuu, fie prin folosirea unei scheme de comandă cu tiristoare. În felul acesta, se obține o reglare rapidă, care poate satisface consumatorii de energie electrică, a căror funcționare produce șocuri de putere în rețelele electrice.

2.3.2. Reglarea tensiunii în rețelele electrice prin modificarea parametrilor rețelei

Acest procedeu de reglare a tensiunii în rețelele electrice presupune modificarea parametrilor rețelei de alimentare cu energie electrică a consumatorilor, fie prin conectarea sau deconectarea circuitelor care funcționează în paralel, fie prin compensarea reactanței inductive a liniilor electrice.

În situația când anumite sectoare ale rețelei electrice sunt formate din două sau mai multe circuite (linii electrice și transformatoare) care pot funcționa în paralel, deconectarea sau conectarea unora dintre ele produce creșterea sau scăderea impedanței longitudinale a rețelei, modificându-se, în felul acesta, căderile de tensiune care apar pe elementele rețelei electrice.

Pentru exemplificare, se consideră rețeaua de alimentare cu energie electrică a unui consumator, formată din două linii electrice care pot funcționa în paralel și o stație de transformare coborâtore sau un post de transformare, echipate cu două transformatoare de putere, a cărei schemă monofilară este reprezentată în Figura 12.

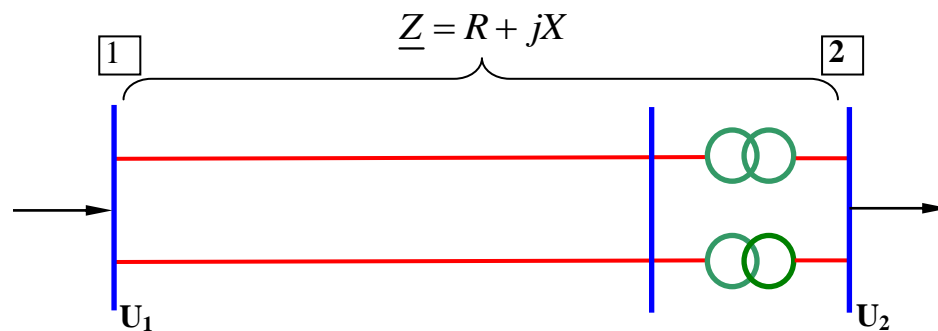


Figura 12. Rețea de alimentare cu energie electrică a unui consumator, prin două circuite în paralel

Pentru rețeaua electrică reprezentată în Figura 12, în regimurile de funcționare la sarcină minimă (redușă) sau gol de sarcină, tensiunea pe barele de alimentare ale consumatorului U_2 poate crește peste valoarea normală. Deconectarea unui circuit al liniei electrice sau a unui transformator din rețea conduce la creșterea impedanței longitudinale a circuitului și respectiv a căderii de tensiune, astfel încât nivelul de tensiune pe barele consumatorului U_2 poate fi coborât. În ceea ce privește regimurile de funcționare la sarcină maximă sau vârf de sarcină, datorită puterilor active și reactive de valori mari tranzitate prin elementele rețelei, căderile de tensiune care apar în rețea vor fi, de asemenea, însemnate, iar nivelul de tensiune pe barele consumatorului va fi mai redus decât valorile normale. Pentru aceste regimuri de funcționare, în vederea menținerii unui nivel de tensiune corespunzător pe barele de alimentare ale consumatorului U_2 , este necesar ca toate elementele rețelei analizate (linii și transformatoare) să fie în funcțiune. În aceste condiții, cele două circuite ale rețelei

electrice fiind în paralel, se micșorează impedanța longitudinală a rețelei, respectiv a căderilor de tensiune, astfel încât nivelul de tensiune pe barele consumatorului U_2 poate fi mărit.

În practica curentă de exploatare, deconectarea transformatoarelor care funcționează în paralel, cu scopul reglării tensiunii pentru regimurile de funcționare cu încărcare redusă, este o măsură recomandată și din punct de vedere al reducerii pierderilor de putere și energie activă în rețelele electrice. Având în vedere că transformatorul este un element component al rețelelor electrice, ce prezintă un nivel de siguranță ridicat în funcționare, este admisă, în general, funcționarea stațiilor sau a posturilor de transformare cu un singur transformator.

Referitor la deconectarea circuitelor liniilor, trebuie avut în vedere faptul că acestea sunt elemente mai puțin sigure în funcționare și, din acest motiv, nu se recomandă, în practica curentă, deconectarea circuitelor de linie pentru reglarea tensiunii în rețelele electrice.

Al doilea procedeu folosit în practică pentru compensarea reactanței inductive a liniilor electrice constă în instalarea unei baterii de condensatoare în serie pe linie, conform reprezentării din Figura 13, obținându-se, în felul acesta, o reducere a reactanței rezultante longitudinale și deci o micșorare a căderilor de tensiune. Notând prin $X_L = \omega L$ reactanța inductivă pe fază a liniei și prin $X_C = 1/\omega C$ reactanța capacitivă înseriată pe o fază a liniei, conform reprezentării din Figura 14, atunci reactanța rezultantă a circuitului devine de forma:

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (14)$$

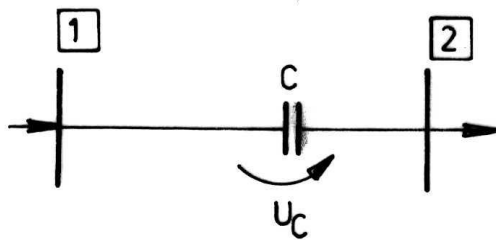


Figura 13. Conectarea unei baterii de condensatoare în serie pe o linie electrică.

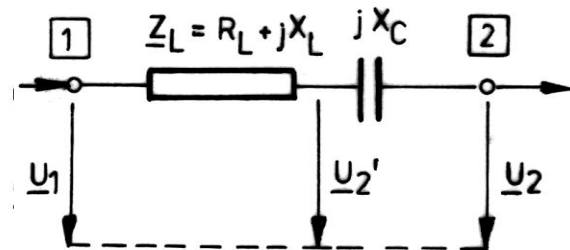


Figura 14. Schema echivalentă simplificată a unei linii electrice scurte, cu compensare serie.

În funcție de valoarea reactanței X_C sau a raportului $\lambda = \frac{X_C}{X_L}$, numit *grad de compensare*, linia electrică se poate găsi în una din situațiile:

- subcompensată $X_C < X_L$, $\lambda < 1$;

- compensată total $X_C = X_L$, $\lambda = 1$;
- supracompensată $X_C > X_L$, $\lambda > 1$.

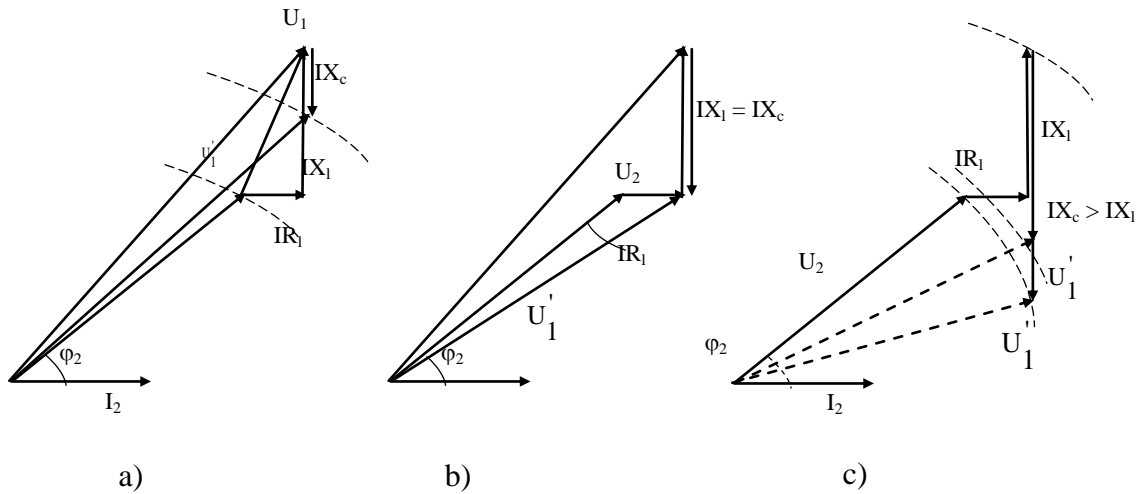


Figura 15 *Diagramele fazoriale ale liniei pentru următoarele situații de compensare:*
 a) *linie subcompensată; b) linie compensată; c) linie supracompensată.*

b)

În Figura 15 sunt reprezentate diagramele fazoriale pentru cele trei situații posibile de compensare prezentate anterior.

Compensarea longitudinală cu baterii de condensatoare montate în serie pe liniile lungi de transport al energiei electrice se realizează în scopul măririi capacității de transport a acestor linii, precum și a limitelor de funcționare stabilă a sistemului electroenergetic.

Din punct de vedere al procesului de reglare a tensiunii, montarea condensatoarelor serie se poate face în orice punct de-a lungul liniei. Totuși, când aceasta alimentează un singur consumator, se preferă, însă, montarea bateriilor de condensatoare spre capătul liniei, din motive de protecție a acestora contra efectelor scurtcircuitelor care pot apărea pe linie.

Dacă linia are conectați, de-a lungul ei, și alți consumatori intermediari, trebuie să se aleagă un loc de montare, astfel ca valoarea căderilor de tensiune să se mențină în limite acceptabile. Considerând linia în sensul alimentării cu energie electrică, tensiunea în linie este crescută numai după punctul de montare a condensatoarelor, spre consumator. Deci, dacă în locul de montare nu se află nici un consumator, prezența condensatoarelor serie poate provoca ridicarea tensiunii în acel punct peste valoarea normală.

De obicei, se admite o anumită cădere de tensiune la capătul liniei, pentru a nu suprasolicita consumatorii racordați pe traseu. Notând cu Q_C valoarea puterii reactive generată de bateria de condensatoare și cu Q_L valoarea puterii reactive consumate pe reactanța inductivă a liniei, între aceste

puteri există următoarea relație $Q_C = \lambda Q_L$. Este evident, deci, că instalația de compensare serie nu contribuie sensibil la îmbunătățirea balanței de putere reactivă la nivelul rețelei electrice.

Pentru reglarea tensiunii, din punct de vedere practic, compensarea serie cu baterii de condensatoare prezintă interes în cazul liniilor de medie tensiune, în următoarele situații:

- ✓ linii electrice aeriene de lungime relativ mare, pentru reducerea variațiilor lente de tensiune la consumatori;
- ✓ linii electrice care alimentează consumatori ce produc șocuri de sarcină în rețea, cum ar fi laminoare, cuptoare cu arc etc., în scopul reducerii șocurilor corespunzătoare de tensiune care apar în rețeaua electrică.

La liniile de medie tensiune, rezistența acestora este, în general, mai mare decât reactanța lor inductivă, astfel încât, la un factor de putere ridicat, componenta activă a căderii de tensiune devine preponderentă. Din aceste motive, folosirea bateriilor de condensatoare serie montate de-a lungul liniilor de medie tensiune este eficientă la un grad de compensare $\lambda > 1$ și pentru un factor de putere căruia îi corespunde $\text{tg}\varphi \geq 0,75$.

De asemenea, trebuie menționat faptul că procesul de compensare serie provoacă unele fenomene negative (ferorezonanță, rezonanță subsincronă, pendularea mașinilor sincrone), fiind necesară o cercetare amănunțită a posibilităților de apariție și înlăturare a acestora. Măsurile care pot fi luate în acest scop sunt următoarele: limitarea gradului de compensare λ la valori cuprinse între 1,5 ÷ 2, utilizarea unor rezistențe serie sau în paralel cu bateria de condensatoare etc.

Un alt dezavantaj al utilizării condensatoarelor serie, pentru compensarea reactanței inductive a liniilor electrice, constă în creșterea curenților de scurtcircuit simetrici și nesimetrici.

Indiferent de tensiunea și lungimea liniei compensate, se iau măsuri speciale pentru protejarea bateriilor de condensatoare împotriva efectelor scurtcircuitelor.

Într-adevăr, când în rețeaua electrică apare un defect (scurtcircuit), condensatoarele sunt traversate de curentul de scurtcircuit și tensiunea la bornele lor devine $U_C = \frac{I_{sc}}{\omega C}$. Aceasta poate depăși de câteva ori tensiunea normală aplicată condensatoarelor. Din aceste motive, bateriile de condensatoare serie se montează în cadrul unor scheme de protecție.

Un alt procedeu pentru modificarea parametrilor rețelelor electrice, în scopul reglării tensiunii, constă în utilizarea reactoarelor reglabile. Acest procedeu se recomandă acolo unde sunt necesare reactoare pentru limitarea valorii curenților de scurtcircuit, care pot apărea accidental în rețelele electrice, iar reglarea centralizată nu satisface exigențele consumatorilor alimentați cu energie electrică. Reactoarele sunt prevăzute cu miez de fier și reactanța lor poate fi reglată printr-o premagnetizare variabilă în curent continuu, funcție de sarcina tranzitată prin linia electrică.

2.3.3 Reglarea tensiunii în rețelele electrice prin introducerea unor tensiuni suplimentare

Introducerea unor tensiuni suplimentare, în scopul reglării tensiunii în rețelele de transport și distribuție a energiei electrice, este unul din procedeele cele mai utilizate. Acest procedeu pare a fi cel mai natural, dar are dezavantajul că nu elimină cauza care provoacă variațiile mari de tensiune și anume variațiile sarcinilor reactive tranzitate prin elementele rețelelor electrice de transport și distribuție.

Introducerea tensiunilor suplimentare se realizează, în principal, cu ajutorul transformatoarelor și autotransformatoarelor cu raport de transformare reglabil.

După modul de introducere a tensiunii suplimentare într-un punct al rețelei electrice, se deosebesc următoarele tipuri de reglare (se va aborda o nouă lucrare de laborator):

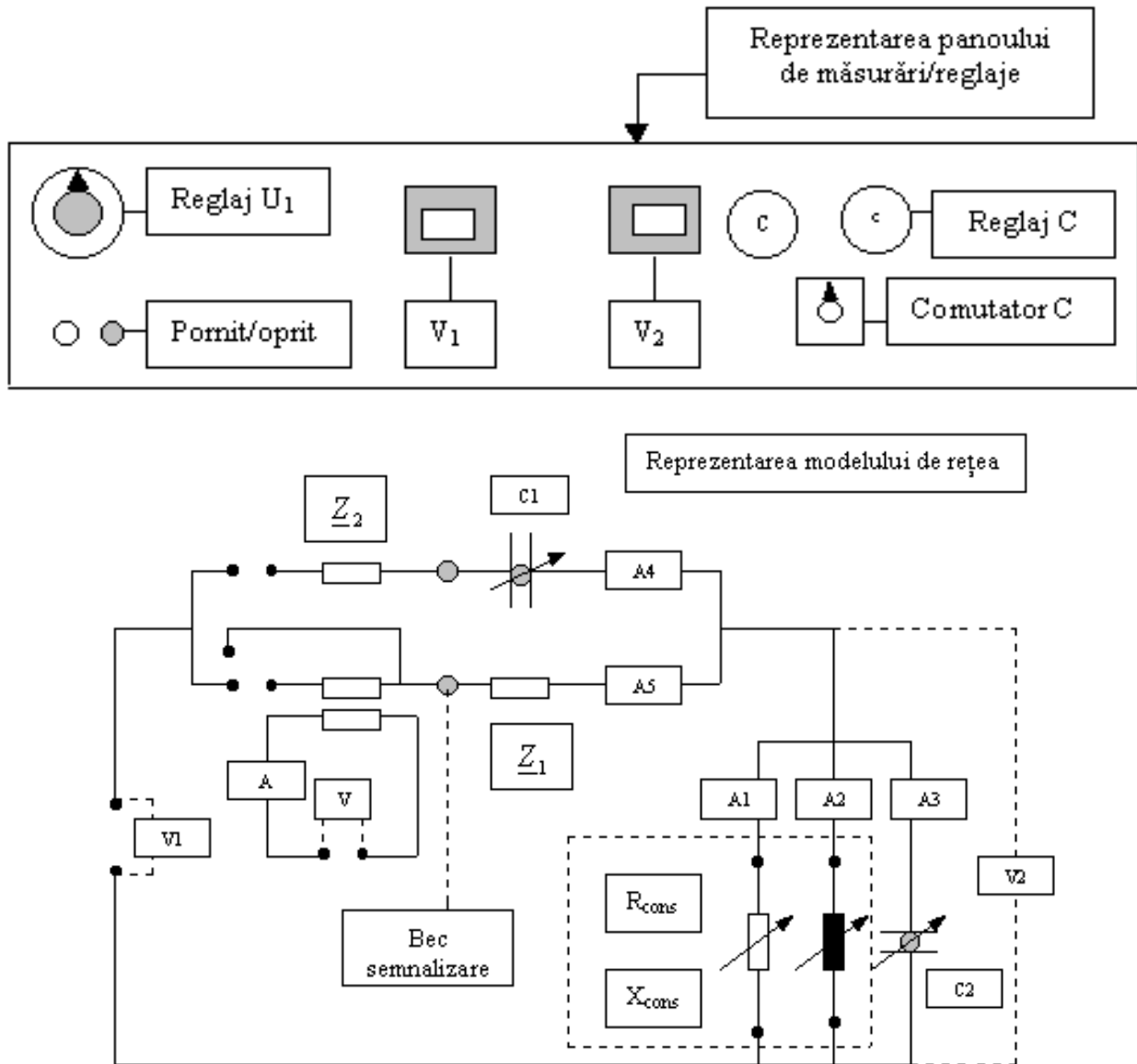
- **reglare longitudinală**, care are rolul de a compensa componenta longitudinală a căderilor de tensiune, tensiunea suplimentară introdusă fiind în fază cu tensiunea rețelei în acel punct;
- **reglare transversală**, când tensiunea suplimentară introdusă este în cuadratură cu tensiunea rețelei în acel punct și are rolul, în principal, de a modifica circulațiile de puteri în rețelele buclate;
- **reglare longo-transversală**, atunci când reglarea longitudinală se folosește corelat cu reglarea transversală.

Din punct de vedere al particularităților constructive și funcționale ale mijloacelor utilizate pentru introducerea de tensiuni suplimentare, se deosebesc două tipuri de reglare:

- **reglare directă**, care se realizează cu ajutorul transformatoarelor și autotransformatoarelor de putere, prevăzute cu prize de reglare pe înfășurările de lucru, precum și cu dispozitive de comutare a acestora în prezența sau în absența sarcinii;
- **reglare indirectă**, care se efectuează cu ajutorul unor transformatoare și autotransformatoare speciale (supravoltoare – devoltoare), formând ansambluri de reglare care pot fi asociate transformatoarelor de putere nereglabile sau pot fi utilizate separat; tot în această categorie intră și regulatoarele de inducție.

3. Descrierea instalației de modelare:

Partea practică a acestei lucrări presupune implementarea metodelor descrise de reglare a tensiunii în rețelele electrice, prin intermediul modelului de rețea simplă, disponibil în incinta laboratorului. Panoul frontal și schema electrică a a instalației utilizate sunt prezentate în continuare, ulterior menționându-se rolul fiecărui element sau aparat reprezentat:



\underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 - impedanțe prin intermediul cărora se modelează impedanța longitudinală a elementelor rețelei ($\underline{Z}_1 = 4 + j8$; $\underline{Z}_2 = 10 + j25$);

C1, C2 – baterii de condensatoare cu trepte de reglaj de $0.5 \mu\text{F}$;

R_{cons} , X_{cons} – rezistența și reactanța variabile prin care se modelează consumatorul;

- V_1, V_2, V – voltmetre prin care se măsoară tensiunile de la începutul și de la sfârșitul liniei, respectiv, tensiunea suplimentară introdusă, în fază sau în cuadratură;
- $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A$ – ampermetre cu ajutorul cărora se măsoară curenții activ și reactiv ceruți de consumator, curentul absorbit de bateria C2, curenții care circulă prin cele două circuite și, respectiv, curentul ce creează tensiunea suplimentară.
- C, c – permit reglajul treptat brut și, respectiv, fin al capacității bateriei de condensatoare selectate cu ajutorul comutatorului C.

În cadrul schemei sunt prevăzute și becuri de semnalizare a stării de funcționare.

4. Modul de desfășurare a lucrării și prelucrarea rezultatelor experimentale:

Etapele esențiale ce trebuie parcurse pentru verificarea practică a metodelor de reglaj descrise anterior sunt:

- Se analizează influența caracterului consumului (de la pur activ până la pur reactiv), asupra căderii de tensiune și, în ipoteza $U_1 = \text{const.}$, asupra tensiunii de la consumator, U_2 . Operațiile practice necesare a fi efectuate și modul de centralizare/reprezentare a datelor obținute sunt:
 - schema utilizată se obține prin punerea sub tensiune a circuitului de impedanță \underline{Z}_2 , cu ajutorul unui jac;
 - stabilind $U_1 = \text{const.}$, se dau valori diferite curenților activ și reactiv ceruți de consumator (prin modificarea corespunzătoare a $R_{\text{cons}}, X_{\text{cons}}$), mergând de la un caracter preponderent activ până la un caracter preponderent reactiv, menținându-se constant curentul total absorbit.
 - datele experimentale sunt sintetizate într-un tabel cu următorul format:

U_1 (V)							
I_4 (A)							
I_a (A)							
I_r (A)							
U_2 (V)							

- se reprezintă grafic curba $U_2 (I_a/I_r)$ și se interpretează.
- Se analizează efectele introducerii unei tensiuni suplimentare (longitudinale, în fază) la începutul rețelei. În acest scop, se utilizează schema construită în cazul anterior, efectuându-se operațiile:
 - se modifică tensiunea de la începutul liniei U_1 , monitorizându-se, în același timp, modul de variație a tensiunii de la sfârșitul liniei U_2 ;
 - rezultatele obținute se trec într-un tabel de forma:

Laborator Transportul și distribuția energiei electrice - B. Neagu

U ₁ (V)								
U ₂ (V)								

- se reprezintă grafic curba U₂ (U₁) și se interpretează.

- Se analizează efectele modificării circulației de putere reactivă tranzitată prin rețea. În acest scop, se instalează în derivație la barele consumatorului o baterie de condensatoare (C2). Operațiile practice necesare și modul de prelucrare a datelor sunt:

- la schema utilizată anterior, pentru U₁ = const., R_{cons} = const., X_{cons} = const., se activează bateria de condensatoare C2 cu ajutorul comutatorului C, ulterior realizându-se o modificare crescătoare, în trepte de 5 μF, a capacității acesteia (prin C, c);
- informațiile obținute cu ajutorul aparatelor de măsură, pentru cazurile de reprezentare echivalentă a liniei prin \underline{Z}_1 și, respectiv, \underline{Z}_2 , sunt centralizate într-un tabel de tipul:

C2 (μF)	U ₁ = const. (V)	\underline{Z}_1	\underline{Z}_2
		U ₂ (V)	U ₂ (V)
0			
5			
10			
15			
20			
25			

- se interpretează variația tensiunii U₂ din perspectiva variației capacității bateriei.
- Se analizează reglajul tensiunii prin modificarea parametrilor rețelei. Într-un prim caz, se verifică experimental efectul modificării numărului de circuite ce funcționează în paralel asupra căderii de tensiune și, implicit, asupra tensiunii la consumator (U₁ = const.). Cu ajutorul jacurilor, se poate simula atât un regim cu o singură linie sub tensiune (\underline{Z}_1), cât și cu două linii în paralel ($\underline{Z}_1 // \underline{Z}_2$).

	1 circuit	2 circuite în paralel
U ₁ (V) = const.		
U ₂ (V)		

- În ceea ce privește compensarea reactanței inductive longitudinale a liniei, trebuie activată bateria de condensatoare C1 și, în condițiile U₁ = const., R_{cons} = const., X_{cons} = const., se modifică capacitatea acesteia în direcția subcompensării ($\lambda < 1$), a compensării totale ($\lambda = 1$) și în direcția supracompensării ($\lambda > 1$). Rezultatele obținute, cu ocazia fiecărui tip de compensare menționat, se trec într-un tabel de forma:

C1 (μF)	$U_1 = \text{const.}$ (V)	U_2 (V)
0		
5		
10		
15		
20		
25		

În final se trasează variația tensiunii U_2 în funcție de variația capacității bateriei de condensatoare și se interpretează rezultatele obținute.

Bibliografie

1. **Georgescu Gh.**, *Sisteme de distribuție a energiei electrice*, Editura Politehniun, Iași, 2007.
2. **Gh. Georgescu, M. Istrate, V. Varvara, ș.a.**, *Transportul și distribuția energiei electrice*, Editura „Gh. Asachi” Iași, 2001.
3. **Gh. Georgescu, M. Gavrițaș, D. Rădășanu**, *Calculul și reducerea pierderilor de putere și energie în rețelele electrice*, Editura Spectrum, Iași, 1997.
4. **Georgescu Gh., Neagu B.**, *Proiectarea și exploatarea asistată de calculator a sistemelor publice de repartitie și distribuție a energiei electrice*, vol. 1, partea I-a, Editura Fundației Academice AXIS, Iași, 2010.
5. **Georgescu Gh.**, *Transportul și distribuția energiei electrice. Lucrări practice de laborator*, Editura Politehniun, Iași, 2005.
6. **Georgescu Gh.**, *Transportul și distribuția energiei electrice. Produse software specializate*, Editura Politehniun, Iași, 2005.
7. **Georgescu Gh.**, *Sisteme de distribuție a energiei electrice*, vol. 1, partea a II-a, Editura Politehniun, Iași, 2007.
8. **Georgescu Gh., Neagu B.**, *Optimal Power Flow in Public Electric Energy Repartition and Distribution Systems*, 7th International Conference on Electromechanical and Power Systems–SIELMEN2009, Iasi, pp. 59-62, ISBN vol. I: 978-606-520-617-5.
9. **Georgescu Gh., Neagu B.**, *Possibilities of Optimal Power Flow in Public Repartition and Distribution Systems of Electric Energy*, The 4th edition of the Interdisciplinarity in Engineering International Conference – inter-eng 2009, Târgu Mureș, ISSN 1843-780X.
10. *** **PE 104/93** *Normativ pentru construcția liniilor aeriene de energie electrică cu tensiuni peste 1000 V*, ICEMENERG, București, 1993.
11. *** **PE 132/2003**, *Normativ pentru proiectarea rețelelor electrice de distribuție publică*, Serviciul Strategie Studii Dezvoltare Rețele – S.C. ELECTRICA S.A., București, 2003.
12. *** **Declarația CME 2000**, raportul ”Energie pentru lumea de mâine. Să acționăm acum!” Editura AGIR, București, 2002.