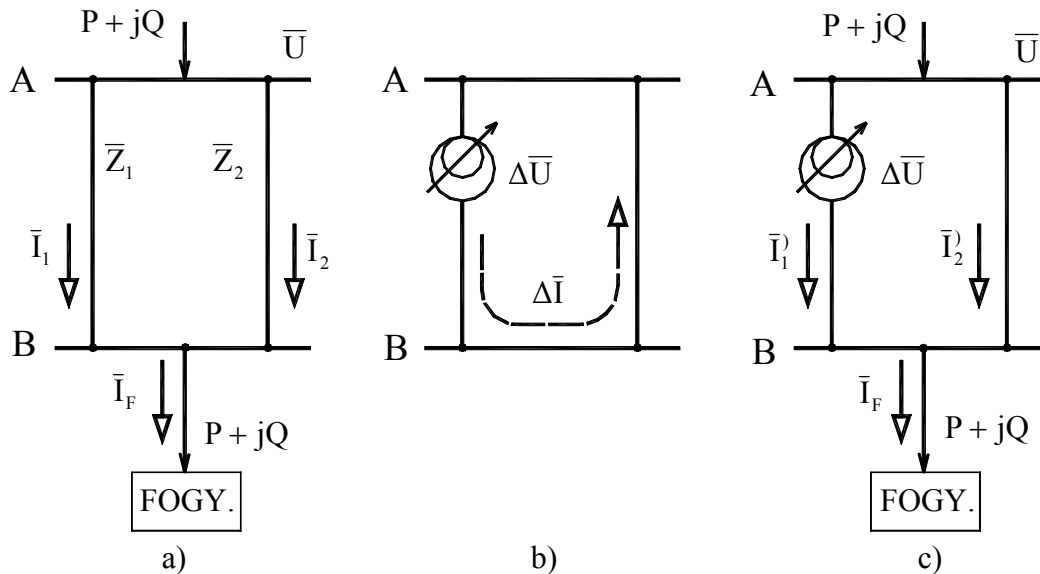


Hurokszabályozás vizsgálata

A nagyfeszültségű alap- illetve elosztóhálózat (400, 220, 120 kV) – a hálózatok funkciójából következően – hurokolt (többszörösen hurokolt) kialakítású. A sok csomóponttal, több betáplálási illetve fogyasztási hellyel rendelkező hálózaton az árameloszlás a mindenkori terhelés és fogyasztás értékétől függően alakul ki. Az egyes ágak áramának jellemzőit a már megismert hálózatszámítási módszerek segítségével, a Kirchhoff törvények alkalmazásával számolhatjuk.

Ez az ún. *természetes árameloszlás* sok esetben kedvezőtlen, mert egyes áramutak terhelése túl nagy, míg másoké alacsony. Ennek megváltoztatására a hálózat alkalmas pontjain soros járulékos feszültséget iktatunk be (1.ábra). A fogyasztó jellemzői és az U feszültség



1. ábra

együttesen határozzák meg a fogyasztó I_F áramát, amely az A és B jelű gyűjtősíneket összekötő párhuzamos ágak I_1 és I_2 áramainak összege (1a. ábra). A járulékos feszültség beiktatása előtt az I_1 és I_2 áramok jellemzőit a párhuzamos ágak Z_1 és Z_2 impedanciáinak jellemzői határozzák meg. A szuperpozíció elve alapján a $\Delta\bar{U}$ járulékos feszültség beiktatásának hatására kialakuló hurokáram (1b. ábra)

$$\Delta\bar{I} = \frac{\Delta\bar{U}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}$$

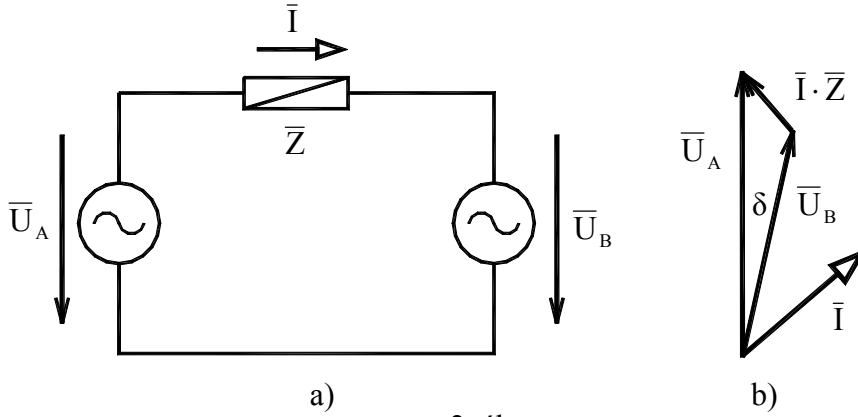
értékű, ha a hurokban található gyűjtősín szakaszok impedanciáját elhanyagoljuk. Így az egyes ágak tényleges árama (1c. ábra):

$$\bar{I}_1' = \bar{I}_1 + \Delta\bar{I} \quad \text{illetve} \quad \bar{I}_2' = \bar{I}_2 - \Delta\bar{I},$$

tehát a $\Delta\bar{I}$ nagyságától és fázishelyzetétől függenek, amit a beiktatott $\Delta\bar{U}$ feszültség jellemzőinek változtatásával módosíthatunk.

Az áramok változása miatt megváltozik az **A** és **B** jelű gyűjtősínek feszültsége is (2. ábra), ami befolyásolja az átvihető teljesítmények értékét. A helyettesítő kapcsolásra a huroktörvényt felírva (2a. ábra):

$$\bar{U}_A - \bar{U}_B - \bar{I} \cdot \bar{Z} = 0, \quad \text{amiből az áram értéke:} \quad \bar{I} = \frac{\bar{U}_A - \bar{U}_B}{\bar{Z}}.$$



2. ábra

Az egyes mennyiségek komplex alakja:

$$\bar{U}_A = U_A \quad \bar{U}_B = U_B \cdot e^{-j\delta} \quad \bar{Z} = Z \cdot e^{j\beta}$$

ahol δ a terhelési szög, β pedig a két gyűjtősínt összekötő ág impedanciájának fázisszöge.

Ezeket visszahelyettesítve az áramra felírt összefüggésbe:

$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_A - \bar{U}_B}{\bar{Z}} = \frac{U_A - U_B \cdot e^{-j\delta}}{Z \cdot e^{j\beta}} = \frac{U_A \cdot e^{-j\beta} - U_B \cdot e^{-j(\delta+\beta)}}{Z}$$

A komplex teljesítmény fogalmának felhasználásával az átvihető teljesítmény:

$$\bar{S} = \bar{U}_A \cdot \bar{I}^* = U_A \cdot \frac{U_A \cdot e^{j\beta} - U_B \cdot e^{j(\delta+\beta)}}{Z} = \frac{U_A^2}{Z} \cdot e^{j\beta} - \frac{U_A \cdot U_B}{Z} \cdot e^{j(\delta+\beta)}$$

Ez alapján a hatásos teljesítmény:

$$P = \text{Re}[\bar{S}] = \frac{U_A^2}{Z} \cdot \cos \beta - \frac{U_A \cdot U_B}{Z} \cdot \cos(\delta + \beta),$$

míg a meddő teljesítmény:

$$Q = \text{Im}[\bar{S}] = \frac{U_A^2}{Z} \cdot \sin \beta - \frac{U_A \cdot U_B}{Z} \cdot \sin(\delta + \beta).$$

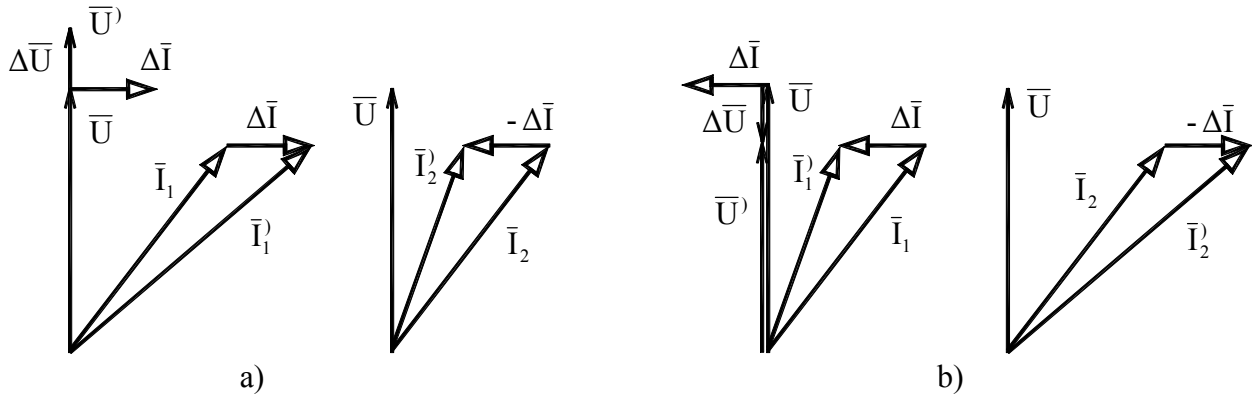
Ha a vezeték ohmos ellenállását elhanyagoljuk, tehát $\beta=90^\circ$, akkor $\bar{Z} = jX$.

Így a teljesítményekre a korábbi tanulmányokból már jólismert kifejezéseket kapjuk meg:

$$P = \frac{U_A^2}{X} \cdot \cos 90^\circ - \frac{U_A \cdot U_B}{X} \cdot \cos(\delta + 90^\circ) = \frac{U_A \cdot U_B}{X} \cdot \sin \delta \quad \text{illetve}$$

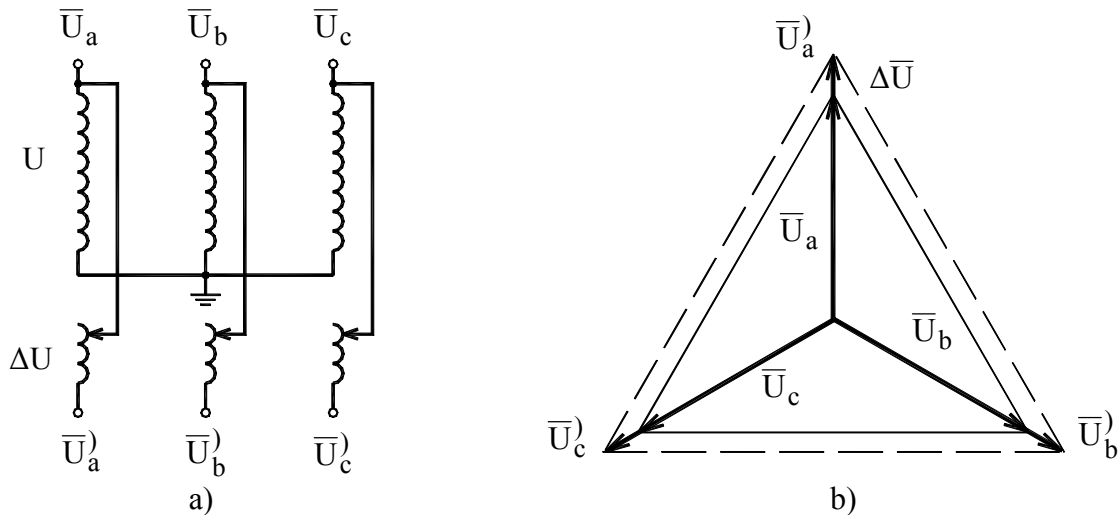
$$Q = \text{Im}[\bar{S}] = \frac{U_A^2}{X} \cdot \sin 90^\circ - \frac{U_A \cdot U_B}{X} \cdot \sin(\delta + 90^\circ) = \frac{U_A^2}{X} - \frac{U_A \cdot U_B}{X} \cdot \cos \delta.$$

Hosszirányú szabályozásról beszélünk akkor, ha a $\Delta\bar{U}$ járulékos feszültség az \bar{U} üzemi feszültséggel azonos fázisú vagy ellenfázisú (3. ábra). Feltételezzük, hogy Z_1 és Z_2 induktív, a hurok ohmos ellenállása elhanyagolható. Ekkor a beiktatott feszültség hatására



3. ábra

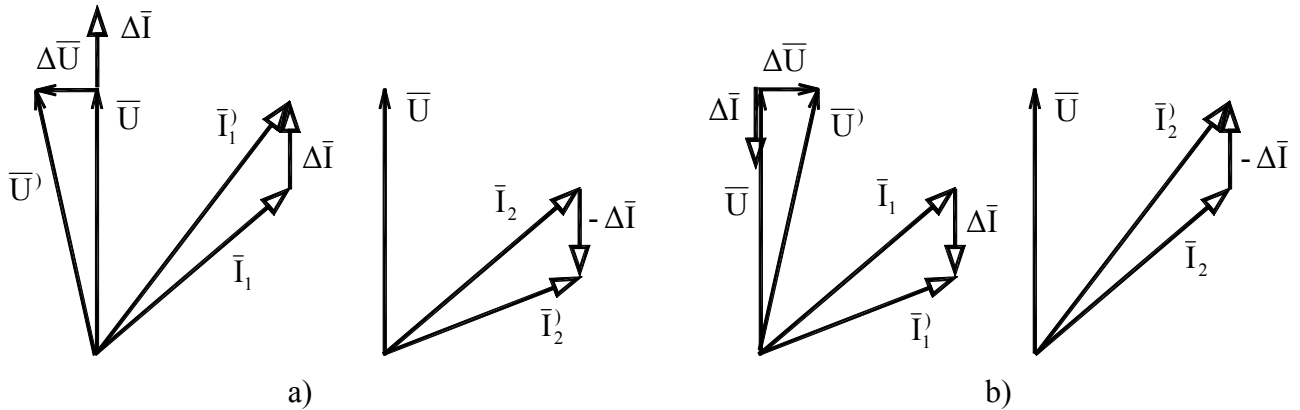
kialakuló $\Delta\bar{I}$ áram 90° -kal késik a feszültséghez képest. Ha a két feszültség azonos fázisú (3a. ábra), akkor az 1 jelű ág árama nagyobb (mert meddő komponense $\Delta\bar{I}$ -vel nagyobb), a 2 jelű ág árama kisebb lesz (mert meddő komponense $\Delta\bar{I}$ -vel kisebb). Ha ellenfázisú a két feszültség (3b. ábra), akkor fordított a helyzet. A fenti fázorábrák alapján megállapíthatjuk, hogy hosszirányú szabályozás esetén az áramok *meddő* komponensének változtatására van lehetőségünk, tehát az átvitt *meddő* teljesítményt változtathatjuk.



4. ábra

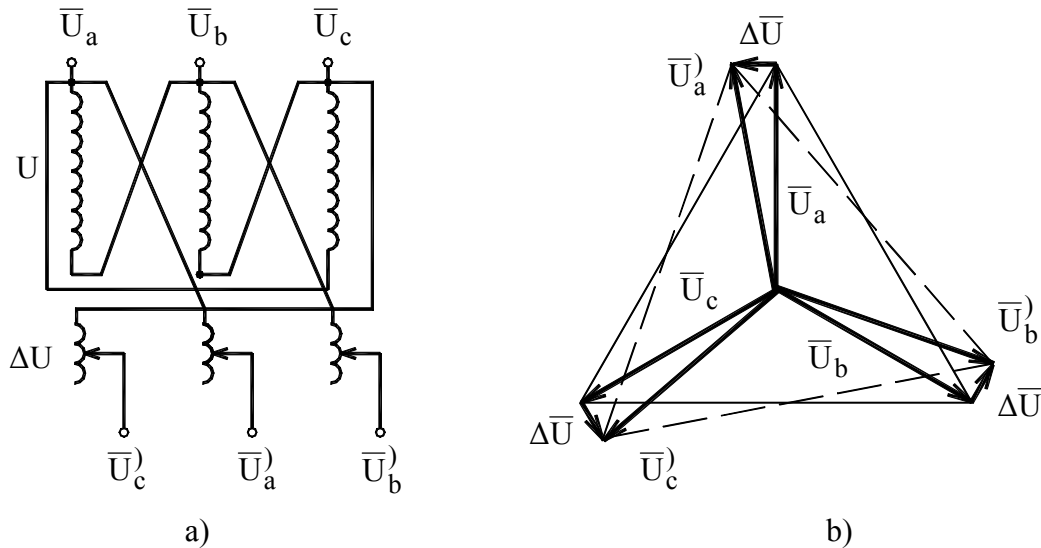
Az ilyen típusú szabályozást különleges transzformátorok biztosítják. A hosszszabályzó transzformátor (4a. ábra) esetén a soros tekercsben keletkező járulékos feszültséget a saját fázis fluxusának változása indukálja, tehát a járulékos feszültség a fázisfeszültséggel megegyező fázishelyzetű. Így a háromfázisú feszültségrendszer fázisviszonyai nem változnak meg, csak a fázisfeszültségek értéke lesz nagyobb (4b. ábra). Az ellenfázisú feszültség a soros tekercs kapcsainak felcserélésével állítható elő, ekkor a feszültségek értéke csökken.

Keresztirányú szabályozásról beszélünk, ha a járulékos feszültség az üzemi feszültséghez képest 90° -kal siet vagy késik (5. ábra). Mivel a beiktatott feszültséghez képest a $\Delta \bar{I}$ áram 90° -kal késik, az \bar{U} feszültséggel azonos fázisú lesz (azonos irányú fázorok - 5a. ábra). Ezért – az előző esethez hasonlóan – az 1 jelű ág árama nagyobb, a 2 jelű ágé kisebb lesz. Viszont lényeges eltérés, hogy itt a változást az áram *wattos* összetevőjének változása okozza, tehát ezzel a módszerrel az átvitt *hatásos* (wattos) teljesítmény értéke szabályozható!



5. ábra

Ha a járulékos feszültség az üzemi feszültséghez képest 90° -kal késik, akkor $\Delta \bar{I}$ az üzemi feszültséggel ellenfázisban lesz (5b. ábra). Az ágáramok változása az előzőekben leírtakhoz hasonló (a wattos összetevő változik), de most I_1 csökken, I_2 pedig nagyobb lesz.

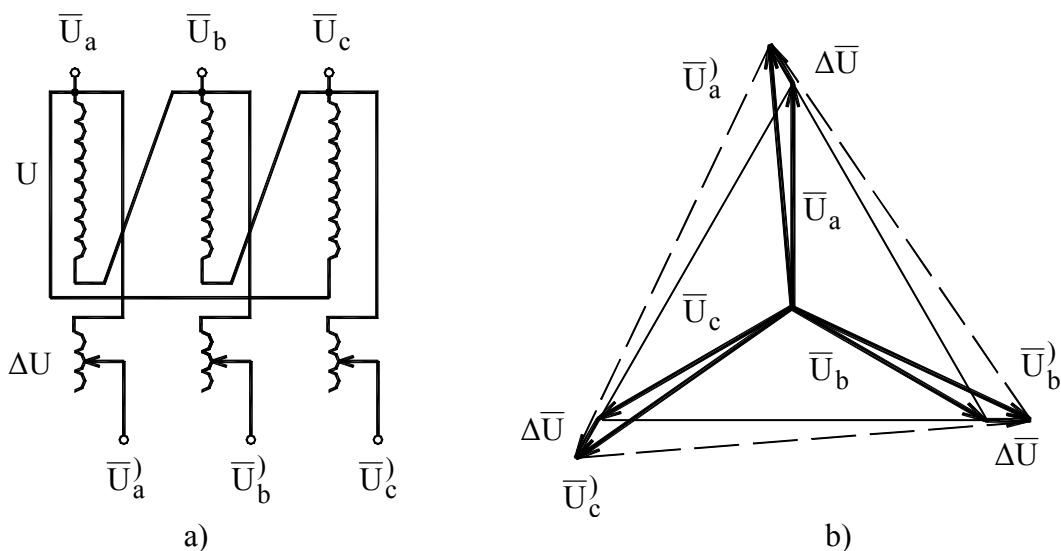


6. ábra

Az ilyen járulékos feszültséget előállító transzformátorokat kereszt-szabályozó transzformátoroknak nevezzük (6. ábra). Az egyes fázisok járulékos feszültsége a másik két fázis közötti vonali feszültséggel megegyező fázishelyzetű lesz (6a. ábra), így biztosítható a 90° -os fáziseltérés. A fázorábrán (6b. ábra) jól látható, hogy itt az eredő fázisfeszültségeknek nemcsak a nagysága, hanem a fázisa is változik.

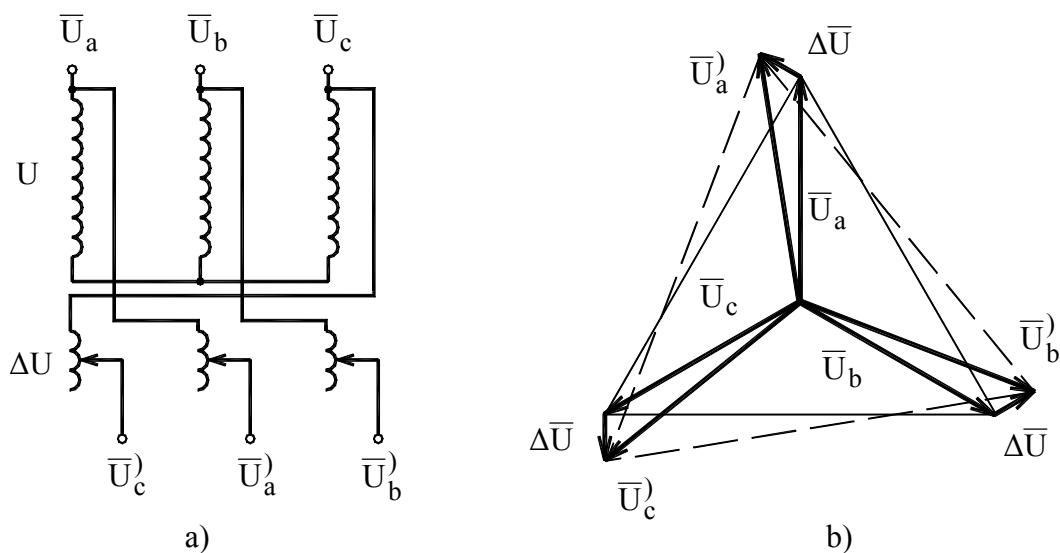
A *ferde szabályozás* a hossz- és a keresztirányú szabályozások kombinációja. Ilyenkor a járulékos feszültség és a fázisfeszültség közötti szög általában 30° vagy 60° , mert ezek kapcsolás-technikailag egyszerűen megvalósíthatók.

A 30° -os szabályozásnál a fázisfeszültséghez adódó járulékos feszültség az adott fázis és az ezt követő fázis közötti vonali feszültséggel megegyező (vagy ellentett) fázisú (7. ábra)



7. ábra

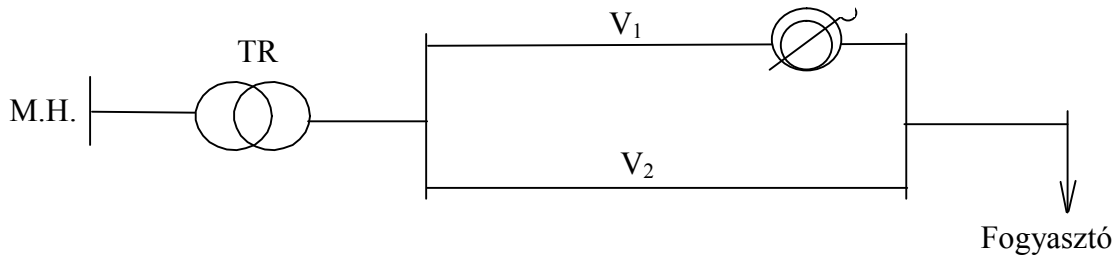
A 60° -os szabályozásnál a járulékos feszültség a következő fázis feszültségével megegyező (vagy ellentett) irányú (8. ábra). A 30° -os szabályozásnál a meddő áramkomponens, míg a 60° -os szabályozásnál a wattos áramkomponens szabályozása a nagyobb mértékű, ha a vezeték ohmos ellenállása viszonylag csekély.



8. ábra

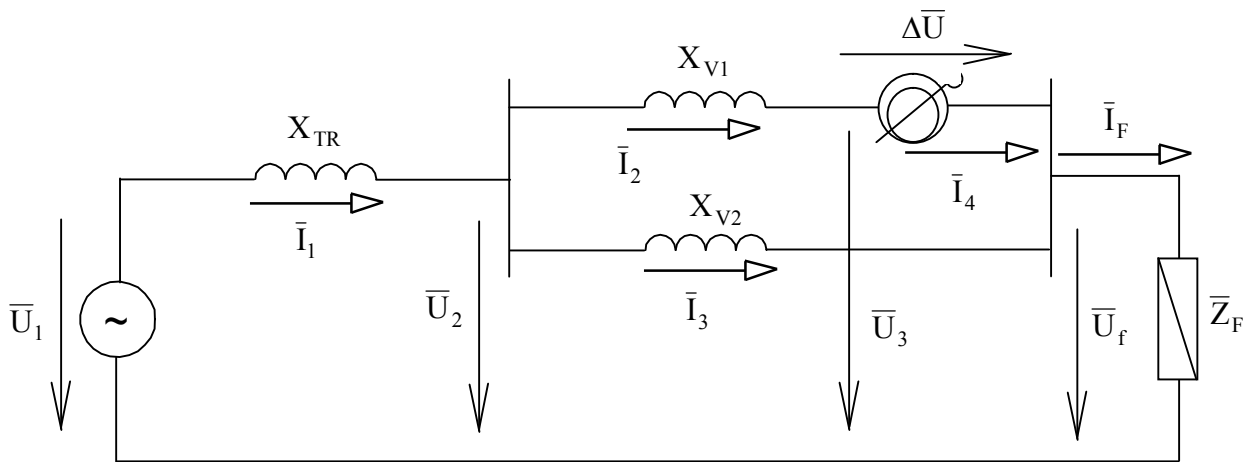
Ha a hurok ellenállását nem hanyagoljuk el, akkor $\Delta \bar{I}$ a $\Delta \bar{U}$ -hoz képest 90° -nál kisebb szöggel kesisik (1. a 2. és 4. ábrákat), tehát a hossz-szabályzó egy kicsit a wattos áramkomponens eloszlását, a kereszt-szabályzó pedig a meddő áramkomponens eloszlását is változtatja.

A fent leírtakat vizsgáljuk meg mennyiségileg is az alábbi példán (9.ábra):



9. ábra

A transzformátort és a szabadvezetéseket helyettesítsük reaktanciájukkal, és rajzoljuk fel az egyfázisú helyettesítő képet! (10. ábra) A fogyasztó teljesítményeit, azaz I_F áramát és az U_f fázisfeszültséget tekintjük állandónak a vizsgálat során.



10. ábra

Írjuk fel a párhuzamosan kapcsolt szabadvezetékek áramait és teljesítményeit az áramkör jellemzőinek ismeretében a $\Delta \bar{U}$ beiktatott feszültség függvényében! Ha $\Delta U=0$, akkor $U_3=U_f$.

Egyébként $\bar{U}_3 - \Delta \bar{U} - \bar{U}_f = 0$, amiből $\frac{\bar{U}_3}{\bar{U}_f} = 1 + \frac{\Delta \bar{U}}{\bar{U}_f}$.

A két feszültség arányát „A”-val jelölve felírhatjuk: $\bar{A} = 1 + \frac{\Delta \bar{U}}{\bar{U}_f}$.

A szabadvezetékek reaktanciáinak segítségével a huroktörvényeket felírhatjuk:

$$(1) \quad \bar{U}_1 - \bar{I}_1 \cdot jX_{TR} - \bar{I}_2 \cdot jX_{V1} - \bar{U}_3 = 0$$

$$(2) \quad \bar{U}_1 - \bar{I}_1 \cdot jX_{TR} - \bar{I}_3 \cdot jX_{V2} - \bar{U}_f = 0$$

Az első egyenletből a másodikat kivonva:

$$(3) \quad \bar{I}_3 \cdot jX_{V2} - \bar{I}_2 \cdot jX_{V1} + \bar{U}_f - \bar{U}_3 = 0$$

Írjuk fel a csomóponi törvényt a jobb oldali csomópontra:

$$(4) \quad \bar{I}_4 + \bar{I}_3 - \bar{I}_F = 0$$

A teljesítmények egyenlősége ($U_3 \cdot I_2 = U_f \cdot I_4$) alapján: $\bar{I}_4 = \frac{\bar{U}_3}{\bar{U}_f} \cdot \bar{I}_2 = \bar{A} \cdot \bar{I}_2$.

Ezt behelyettesítve, és az egyenletet jX_{V2} -vel bővítve:

$$(5) \quad jX_{V2} \cdot \bar{A} \cdot \bar{I}_2 + jX_{V2} \cdot \bar{I}_3 - jX_{V2} \cdot \bar{I}_F = 0.$$

A (3) egyenletbe $\bar{U}_3 = \bar{A} \cdot \bar{U}_f$ -et behelyettesítve:

$$(6) \quad \bar{I}_3 \cdot jX_{V2} - \bar{I}_2 \cdot jX_{V1} + \bar{U}_f - \bar{A} \cdot \bar{U}_f = 0.$$

Ezt az (5) egyenletből kivonva, és az I_2 áramra rendezve:

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_f \cdot (1 - \bar{A}) + jX_{V2} \cdot \bar{I}_F}{jX_{V1} + jX_{V2} \cdot \bar{A}}.$$

Ennek ismeretében a további áramok illetve feszültségek:

$$\begin{aligned} \bar{I}_4 &= \bar{A} \cdot \bar{I}_2 & \bar{I}_3 &= \bar{I}_F - \bar{I}_4 & \bar{I}_1 &= \bar{I}_2 + \bar{I}_3 \\ \bar{U}_3 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_f & \bar{U}_2 &= \bar{I}_3 \cdot jX_{V2} + \bar{U}_f & \bar{U}_1 &= \bar{I}_1 \cdot jX_{V1} + \bar{U}_2 \end{aligned}$$

A hálózati teljesítmény-eloszlást a komplex teljesítmény fogalmának ($\bar{S} = \bar{U} \cdot \bar{I}^*$) alkalmazásával határozhatjuk meg a rendelkezésre álló áramok és feszültségek alapján. Néhány jellemző esetre meghatároztuk az alábbi adatok esetén:

Transzformátor: $U_n = 220/120 \text{ kV}$, $S_n = 120 \text{ MVA}$, $\varepsilon = 8 \%$.

$$X_{TR} = \frac{8}{100} \cdot \frac{120^2}{120} = 9,6 \ \Omega$$

Szabadvezetékek: $l_{v1} = l_{v2} = 50 \text{ km}$, $x_v = 0,4 \text{ ohm/km}$.

$$X_{V1} = X_{V2} = l_{V1} \cdot x_v = 50 \cdot 0,4 = 20 \ \Omega$$

Fogyasztó: $U_n = 120 \text{ kV}$, $S_n = 104 \text{ MVA}$, $\cos\varphi = 0,8$.

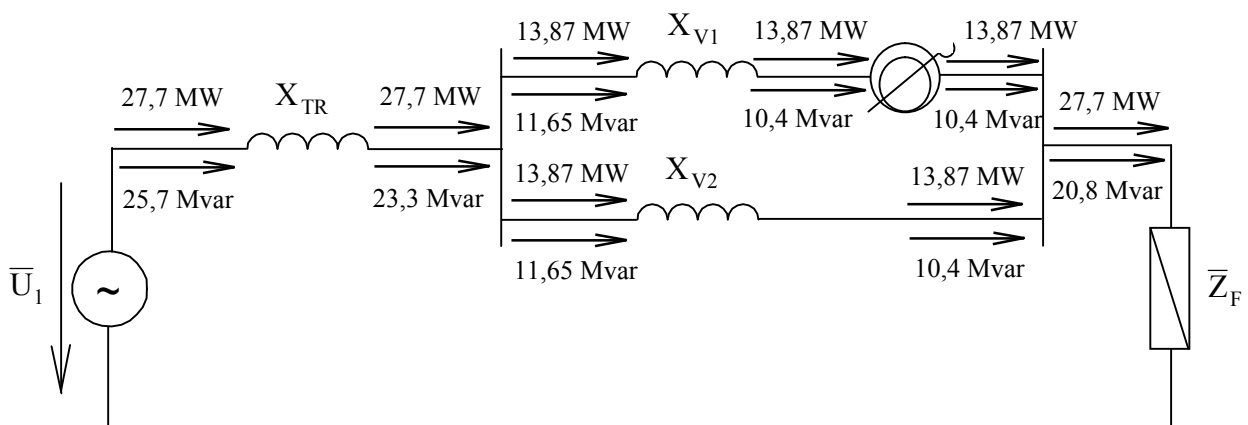
$$\bar{I}_F = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \cdot (\cos\varphi - j \sin\varphi) = \frac{104}{\sqrt{3} \cdot 120} (0,8 - j0,6) = (0,4 - j0,3) \text{ kA}.$$

Mivel $X_{V1} = X_{V2} = X_V$, ezért az összefüggés egyszerűbb alakban is megadható:

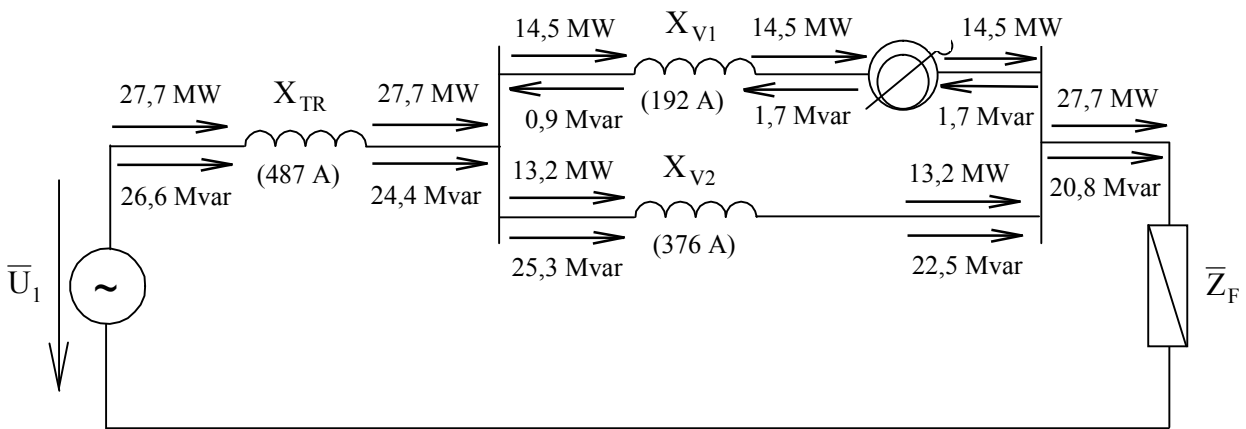
$$\bar{I}_2 = \frac{\frac{\bar{U}_f}{jX_V} \cdot (1 - \bar{A}) + \bar{I}_F}{1 + \bar{A}}.$$

A következőkben megadjuk az alapesethez ($\Delta U=0$) tartozó teljesítmény-eloszlást is, hogy a változások jellege és mértéke jobban követhető legyen.

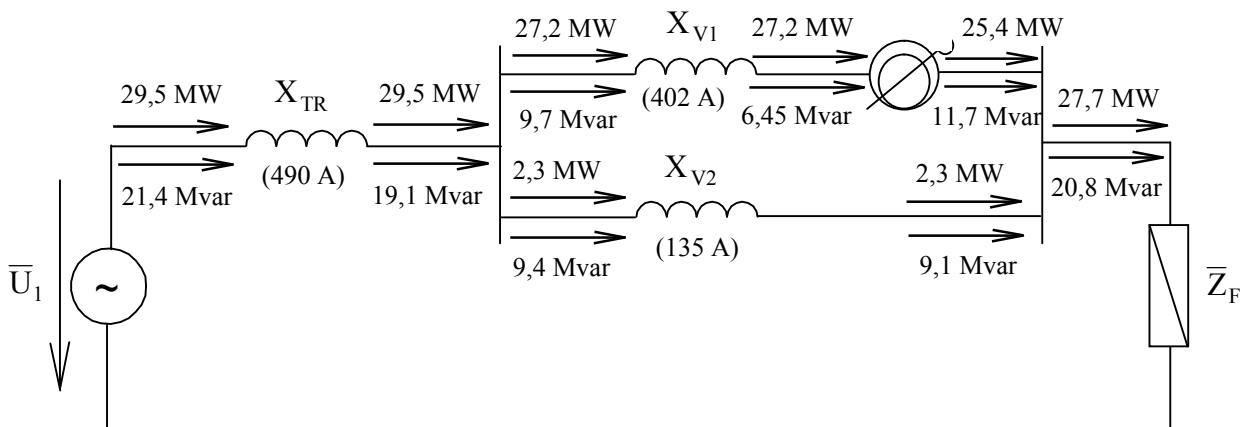
Teljesítmény-eloszlás a szabályozás nélküli esetben ($\Delta \bar{U} = 0$, $\bar{A} = 1$):



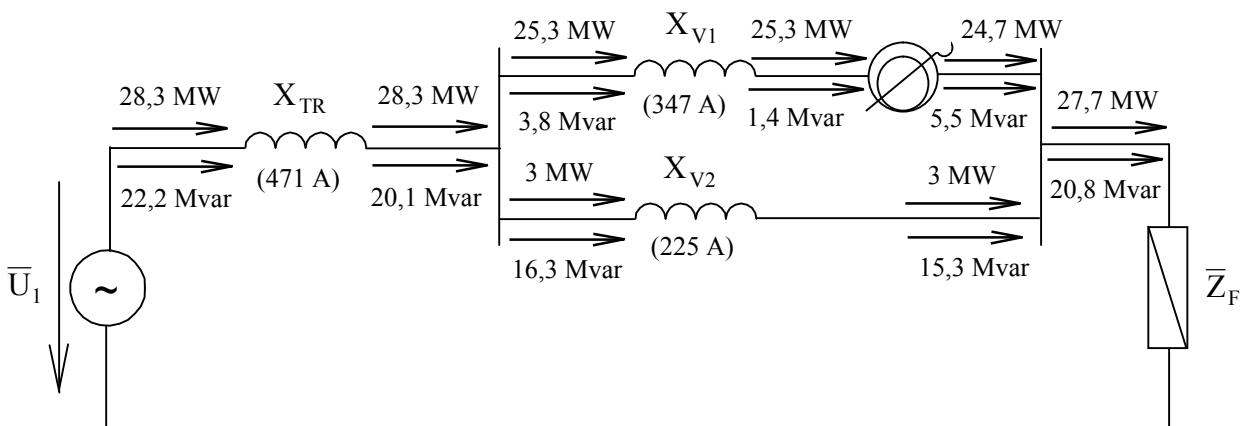
Teljesítmény-eloszlás hosszirányú szabályozás esetén ($\Delta \bar{U} = 0,1 \cdot U_f$ $\bar{A} = 1,1$):



Teljesítmény-eloszlás keresztirányú szabályozás esetén ($\Delta \bar{U} = -j0,1 \cdot U_f$ $\bar{A} = 1 - j0,1$):

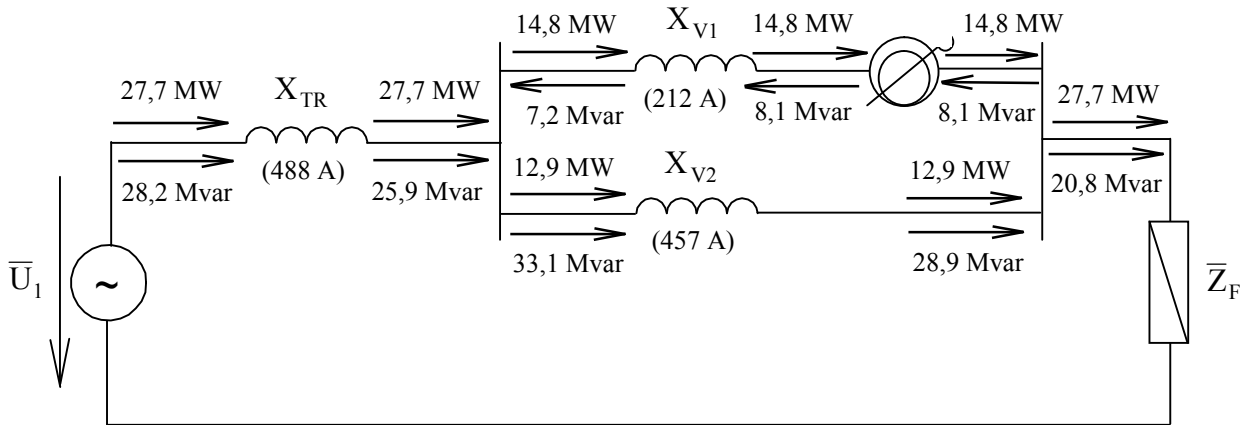


Teljesítmény-eloszlás ferde szabályozás esetén ($\Delta \bar{U} = (3,46 - j6) \text{ kV}$ $\bar{A} = 1,05 - j0,087$):
 $(\Delta U = 0,1 \quad \varphi = -60^\circ)$

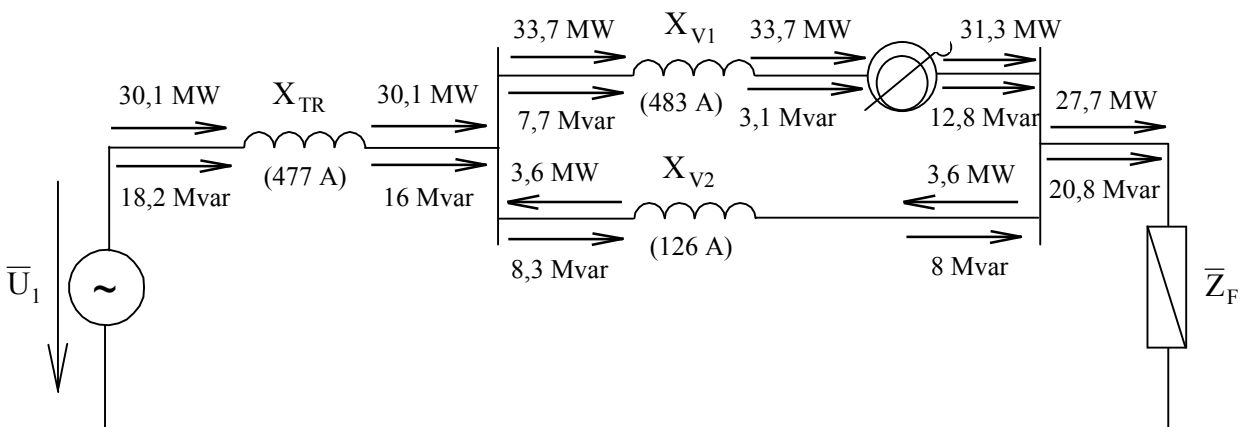


Ha a beiktatott feszültségnek csak a nagyságát változtatjuk - a fázisszögét nem -, akkor a változás jellege megmarad, csak a mértéke fog megváltozni:

Teljesítmény-eloszlás hosszirányú szabályozás esetén ($\Delta \bar{U} = 0,15 \cdot U_f$ $\bar{A} = 1,15$):



Teljesítmény-eloszlás keresztirányú szabályozás esetén ($\Delta \bar{U} = -j0,15 \cdot U_f$ $\bar{A} = 1 - j0,15$):



Hosszirányú szabályozás esetén a meddő teljesítmény áramlásának iránya megfordult már 10 %-os feszültség esetén is, a feszültség növelésével a meddő teljesítmény értéke is nagyobb lesz. A wattos teljesítmény vonatkozásában jelentős változás nem következett be a kiindulási (szabályozás nélküli) esethez képest.

Keresztirányú szabályozás esetén a meddő teljesítmény megoszlása alig változik, viszont a szabályozott ágba átvihető hatásos teljesítmény értéke a beiktatott feszültség növekedésével egyre nagyobb lesz. 15 %-os feszültség esetén az átvitt wattos teljesítmény már nagyobb a fogyasztó által igényeltnél, ezért a söntágban a wattos teljesítmény áramlásának iránya megfordul (visszatáplálás).

Az ábrákon feltüntettük az egyes ágak áramának nagyságát is. Az eredő áram értéke (nagysága) alig változik, ugyanakkor az ágáramok jelentősen változnak. Hosszirányú szabályozás esetén a szabályozott ág árama lényegesen kisebb mint a söntág árama, míg a keresztirányú szabályozásnál fordított a helyzet.

A vizsgált rendszert szimmetrikusnak tételezzük fel, ezért a jellemzőket csak egy fázisban vizsgáljuk.

Elvégzendő mérési feladatok:

- 1.) A fogyasztó jellemzőinek meghatározása: Meghatározzuk a fogyasztó hatásos, meddő és látszólagos teljesítményének értékét. Ehhez áramát, feszültségét és hatásos teljesítményét egy fázisban mérjük, a meddő és a látszólagos teljesítményét ez alapján számoljuk. A mérés során áramát és feszültségét ellenőrizzük. Ha ezek nem változnak, akkor a felvett teljesítményt is állandónak tekintjük.
- 2.) A szabályozott jellemzők vizsgálata a szög függvényében: Egy állandó értékű (nagyságú) beiktatott feszültség esetén a feszültség fázisszögét változtatjuk a $0 \dots 180^\circ$ tartományban. Meghatározandó az egyes ágak árama és teljesítményeik. Ehhez mindkét ágban mérjük az áram nagyságát, valamint a szabályozott ágban a wattos teljesítmény értékét. Ezek ismeretében meg kell határozni a söntág hatásos teljesítményét, valamint mindkét ágban a meddő teljesítményeket.
- 3.) Hosszirányú szabályozás vizsgálata: a beiktatott feszültség nagyságát változtatjuk $\varphi = 0^\circ$ mellett a fogyasztói fázisfeszültség $-5 \dots +5$ %-os tartományában. Meghatározandók mindkét ág teljesítményei (wattos és meddő teljesítmény).
- 4.) Keresztirányú szabályozás vizsgálata: a beiktatott feszültség nagyságát változtatjuk két esetben ($\varphi = +90^\circ$ és $\varphi = -90^\circ$ mellett) a fogyasztói fázisfeszültség $-5 \dots +5$ %-os tartományában. Meghatározandók mindkét ág teljesítményei (wattos és meddő teljesítmény).
- 5.) Ferde szabályozás vizsgálata: a beiktatott feszültség nagyságát változtatjuk megadott fázisszögek mellett a fogyasztói fázisfeszültség $-5 \dots +5$ %-os tartományában. Meghatározandók mindkét ág teljesítményei (wattos és meddő teljesítmény).

Ellenőrző kérdések:

- 1.) Mikor és miért válhat szükségessé a természetes árameloszlás megváltoztatása?
- 2.) Hogyan változtatható meg a természetes árameloszlás?
- 3.) Mi befolyásolja az átvihető teljesítmény értékét, és hogyan határozható meg?
- 4.) Mit értünk hosszirányú szabályozás alatt?
- 5.) Rajzolja fel a hosszirányú szabályozás fázorábráit!
- 6.) Mit értünk keresztirányú szabályozás alatt?
- 7.) Rajzolja fel a keresztirányú szabályozás fázorábráit!
- 8.) Hogyan állítható elő a járulékos feszültség a hossz- illetve kereszt-szabályozó transzformátorokkal?
- 9.) Mit értünk ferde szabályozás alatt, és hogyan állítható elő a járulékos feszültség?
- 10.) Milyen tényezőktől függ a párhuzamosan kapcsolódó ágakban kialakuló áramok illetve áramló teljesítmények értéke?
- 11.) Ismertesse a mérésen alkalmazott kisfeszültségű modell jellemzőit!
- 12.) Ismertesse a mérésen elvégzendő feladatokat!
- 13.) Hogyan határozható meg a fogyasztó látszólagos és meddő teljesítménye, ha ismert árama, feszültsége és hatásos teljesítménye?