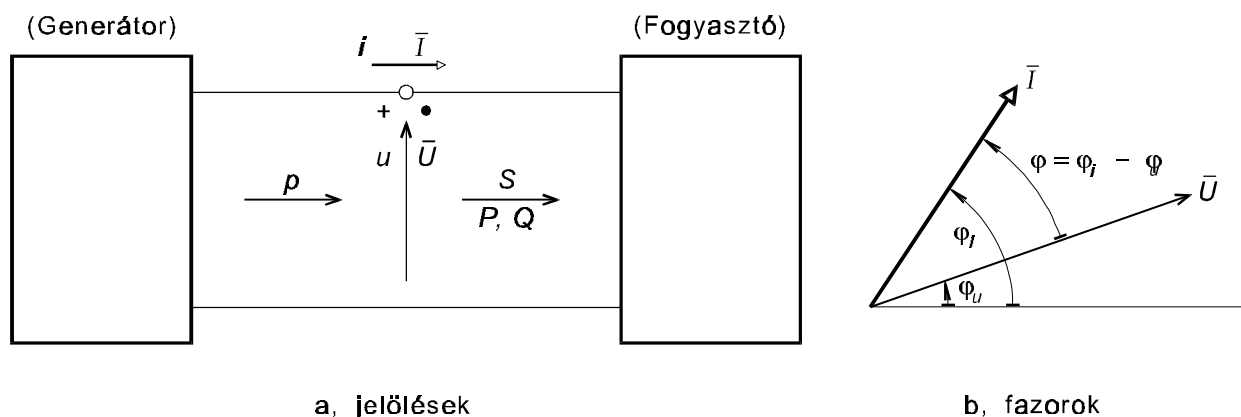


Két nemzetközi viszonylatban kiépített átviteli rendszer van, amelynek az átviteli közege a villamosság. Az egyik a távközlő rendszer, amelyet a következő fő követelményekre terveznek: információátviteli kapacitás, átviteli minőség, megbízhatóság. A másik a villamosenergia-átviteli rendszer, amelynél a fő tervezési követelmények: teljesítmény-átviteli kapacitás, az átviteli minőség, megbízhatóság, gazdaságosság. Látható, hogy az alapvető különbség az első követelményben van, bár a többi tartalma is sokban eltérhet. A távközlésnél szereplő információ fogalom nehezen definiálható egyértelműen. A villamosenergia-átvitelt jellemző teljesítmény

viszont jól definiált, IEC előírásban rögzített fogalom. A következőkben röviden áttekintjük az egy- és a háromfázisú rendszerekkel kapcsolatos feszültség-, áram, valamint a különösen fontos teljesítmény fogalmakat és a legfontosabb elektrotechnikai ismereteket.

1.3.1. Egyfázisú rendszer

Az egyfázisú váltakozó áramú összeköttetés állandósult (kvázistacioner) állapotára és egy adott helyre vonatkoztatott viszonyait az 1-5. ábra szerinti áram, feszültség és teljesítmény kisbetűvel jelölt időfüggvényeivel, vagy komplex jellemzőket használva a felülhúzott nagybetűvel jelölt fázor-mennyiségekkel írhatjuk le.



1-5. ábra Egyfázisú rendszer jellemzői egy adott helyen

Az ω körfrekvenciájú szinuszos lefolyású áram és feszültség

– időfüggvénye (pillanatértéke)

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \cos(\omega t + \mathbf{j}) = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \mathbf{j}) \\ u(t) &= U_m \cos(\omega t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

– komplex pillanatértéke

$$\begin{aligned} \bar{i} &= I_m e^{j(\omega t + \mathbf{j})}; \\ \bar{u} &= U_m e^{j(\omega t)} \end{aligned} \quad (1-2)$$

(Ezeknek egy adott irányra - esetünkben a feszültséggel megegyező irányra - való vetülete megadja az időfüggvényt.)

– fazora, azaz komplex effektív értéke

$$\bar{I} = I e^{j\mathbf{j}} = I \angle \mathbf{j} \quad (1-3)$$

ahol

I_m és U_m az áram- és feszültség hullám maximuma (amplitúdója)

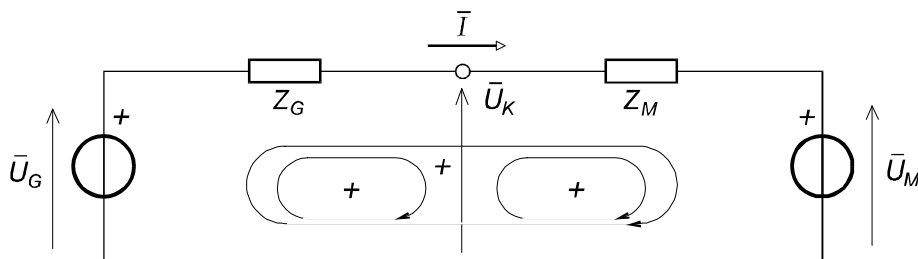
I és U az áram és feszültség effektív értéke

$\mathbf{j} = \mathbf{j}_i - \mathbf{j}_u$ az áramnak a feszültséghez képest mért fázisszöge (1-5b és 1-6a ábra)

Megjegyezzük, hogy általános esetben az áram fázishelyzetét \mathbf{j}_i , a feszültségét \mathbf{j}_u írja le. Ha referenciaként a feszültség fázishelyzetét választjuk, akkor az előzőekben feltételezettek szerint $\mathbf{j}_u = 0$ és $\mathbf{j}_i = \mathbf{j}$.

Az áram referencia (pozitív) iránya tetszőlegesen felvehető és nyíliránnyal jelölhető. Az áram pozitív, ha iránya megegyezik a pozitív iránnyal.

Két pont közötti feszültség referencia (pozitív) iránya önkényesen választható és azt a kisebb potenciálúnak feltételezett referenciaponttól a nagyobb pont felé mutató nyílall, vagy a nagyobb potenciálú pontnál elhelyezett + jellel tüntettük fel (1-5. ábra). Egy feszültség akkor pozitív, ha a neki megfelelő térerősségnek a pozitív irány szerinti vonalintegrálja pozitív. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy a pozitív (körüljárási) iránnyal megegyező polaritású forrás-feszültség (elektromotoros erő), azaz feszültségemelkedés pozitív, a körüljárási iránnyal megegyező irányban folyó (pozitív) áram által okozott feszültségésés pedig negatív.



1-6. ábra Pozitív irányrendszer

Példaként az 1-6. ábrán feltüntetett pozitív irányokkal felírható hurokegyenlet

– a teljes hurokra

$$\bar{U}_G - \bar{Z}_G \bar{I} - \bar{Z}_M \bar{I} - \bar{U}_M = 0$$

– a generátor (G) oldalra az U_K feszültségig

$$\bar{U}_G - \bar{Z}_G \bar{I} - \bar{U}_K = 0$$

– a motor oldalra az U_K kapocsfeszültségtől

$$\bar{U}_K - \bar{Z}_M \bar{I} - \bar{U}_M = 0$$

Az egyfázisú rendszer egy adott helyén a villamos teljesítmény időfüggvénye:

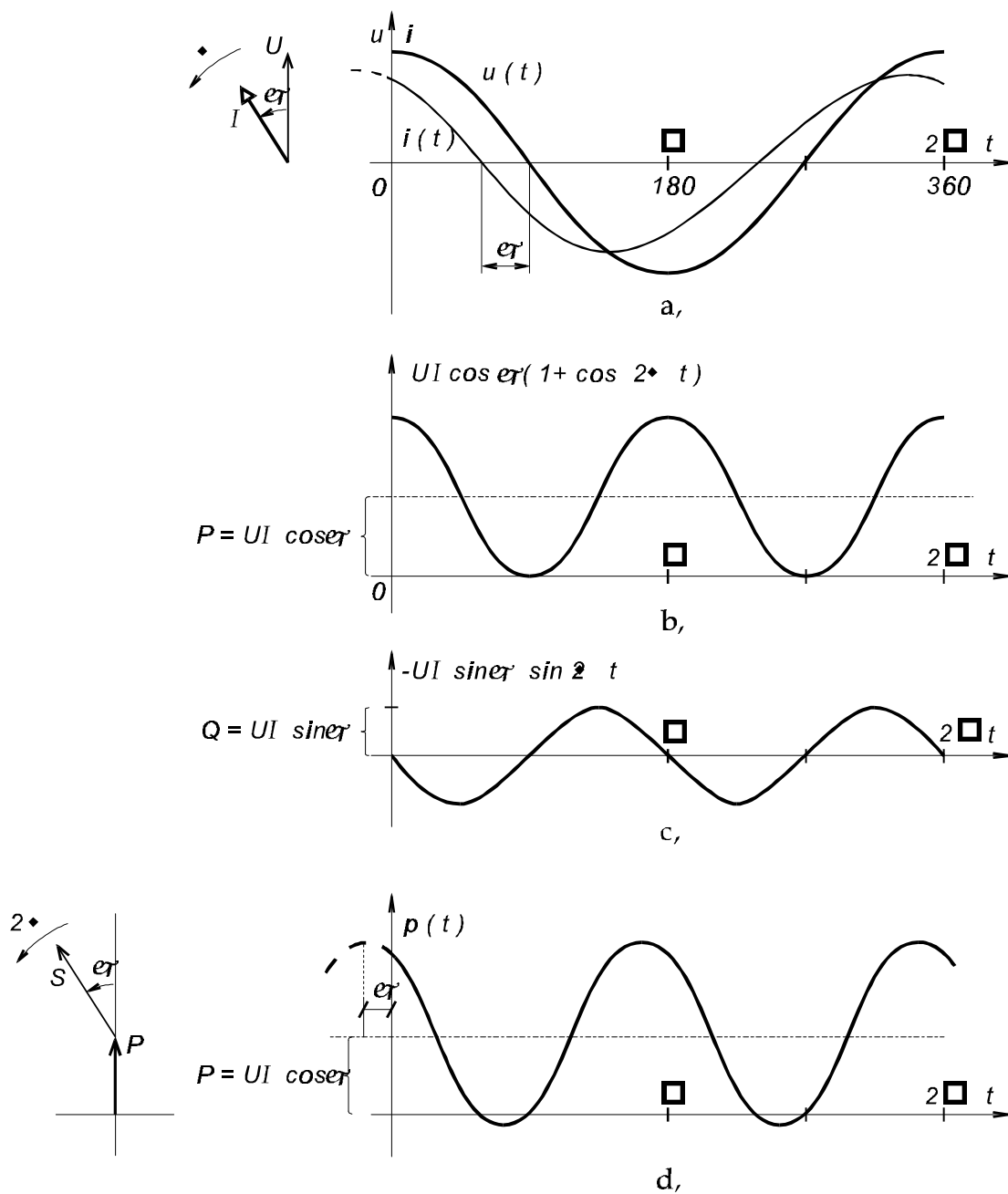
$$p(t) = u(t)i(t) \tag{1-4}$$

A feszültség és az áram időfüggvényét az (1-1) összefüggésből behelyettesítve és megfelelő trigonometriai átalakítás után a pillanatnyi teljesítmény időfüggvénye:

$$p(t) = UI \cos \mathbf{j} (1 + \cos 2\omega t) - UI \sin \mathbf{j} \sin 2\omega t = P(1 + \cos 2\omega t) + Q \sin 2\omega t \tag{1-5}$$

vagy további átrendezéssel más formában:

$$p(t) = UI \cos \mathbf{j} + UI \cos(2\omega t + \mathbf{j}) = P + S(2\omega t + \mathbf{j}) \tag{1-6}$$



1-7. ábra A pillanatnyi teljesítménnyel kapcsolatos fizikai mennyiségek

- a) a feszültség, az áram és a fázisszög ($\varphi > 0$),
- b) az átlagértékű teljesítménytag,
- c) a lengőtag,
- d) az eredő pillanatnyi teljesítmény

A pillanatnyi teljesítménnyel kapcsolatos időfüggvényeket az 1-7. ábra szemlélteti.

Az (1-5) összefüggés első tagja fejezi ki a pillanatnyi hatásos teljesítményt. Ennek a kétszeres frekvenciával változó teljesítménynek (1-7b ábra) az átlagértéke a hatásos teljesítmény:

$$P = UI \cos j \quad (1-7)$$

Az (1-5) összefüggés második tagja fejezi ki a pillanatnyi meddőteljesítményt. Ez is kétszeres frekvenciával leng, amplitúdója

$$Q = UI \sin j \quad (1-8)$$

meddő teljesítmény, amelynek az időbeli átlaga nulla (1-7c ábra).

Az (1-5) összefüggés szerint az eredő pillanatnyi látszólagos teljesítmény a P hatásos teljesítménnyel eltolt középvonal körül kétszeres frekvenciával leng (1-7. ábra) és az amplitúdója az

$$S = UI \quad (1-9)$$

látszólagos teljesítmény.

A komplex teljesítmény a feszültség és az áram fazorral, pontosabban az áram fazor \bar{I}^* konjugáltjával a következő összefüggéssel fejezhető ki:

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{U}\bar{I}^* = UI \angle j_u - j_i = UI \angle \Phi = UI \angle -j \quad (1-10)$$

– amelynek a valós része a hatásos teljesítmény

$$P = \operatorname{Re}(\bar{S}) = UI \cos \Phi = UI \cos j$$

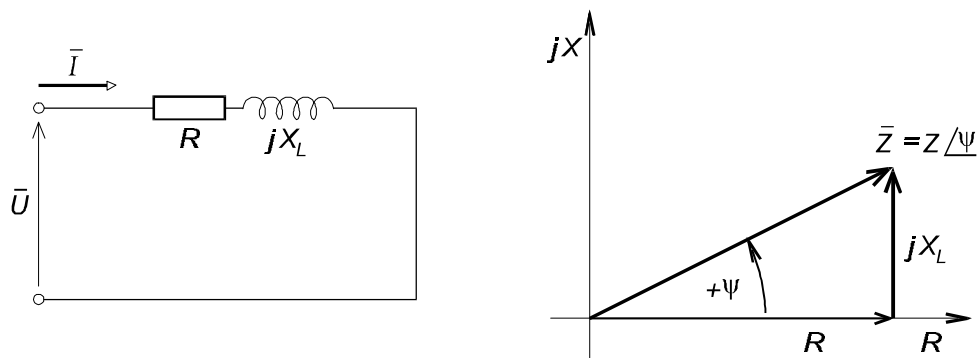
a képzetes része a meddő teljesítmény

Ezek megegyeznek az időfüggvényekkel kapcsolatosan levezetett (1-7) és (1-8) kifejezésekkel.

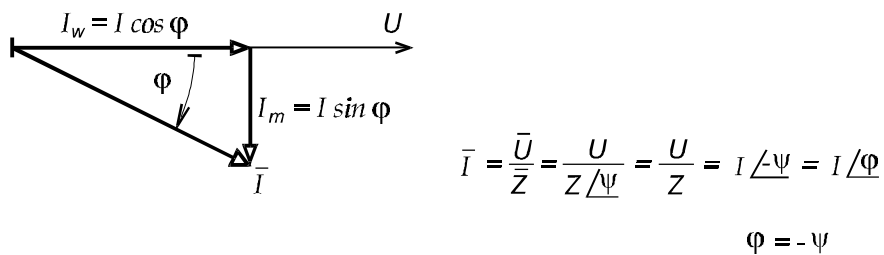
Az 1-8. ábra szemlélteti a tipikusnak tekinthető ohmos és induktív jelleg (motoros) fogyasztó komplex jellemzőinek fázisviszonyait. Látható, hogy az impedancia ψ szöge és X_L reaktanciája pozitív, az áram φ szöge és meddő komponense negatív, a teljesítmény Φ szöge és meddő komponense ismételtén pozitív. A valós komponens mind a három jellemző esetén pozitív.

Megállapítható, hogy a tipikus, azaz ohmos és induktív jellegű (motoros) fogyasztó által felvett hatásos és meddő teljesítmény is pozitív. Hasonlóképpen a tipikus fogyasztót tápláló generátornak is pozitív mind a hatásos, mind pedig a meddő teljesítménye a generátoros pozitív irányrendszerben. A generátoros és fogyasztói pozitív irányrendszert együtt szemlélteti az 1-9. ábra.

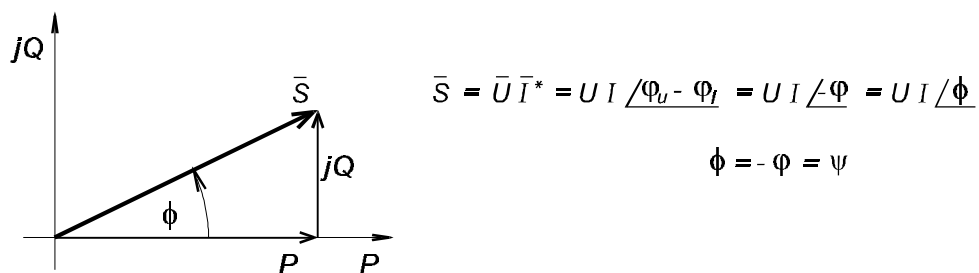
Az áram pozitív iránya mindkét elemnél megegyezik a feltételezett teljesítményáramlás (generátornál kifelé, fogyasztónál befelé) irányával. A két esetben az áram és a feszültség egymáshoz képesti relatív helyzete különböző.



a, impedancia (ψ szög és X_L reaktancia pozitív)



b, áram (ϕ szöge és I_m meddő komponense negatív)



c, teljesítmény (Q meddő teljesítmény és Φ szög pozitív)

1-8. ábra A tipikus ohmos és induktív fogyasztó (motor) komplex impedanciája, árama és teljesítménye

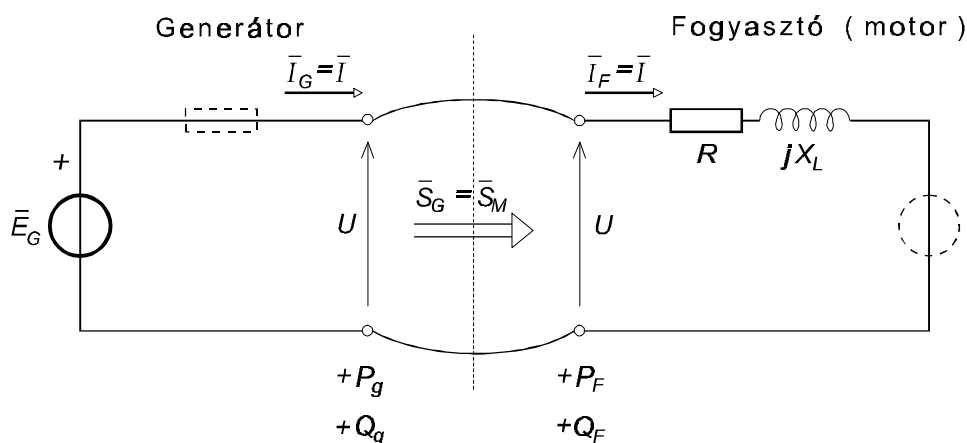
A teljesítmény előjelek értelmezését generátoros és fogyasztói pozitív irányrendszerben az 1-1. táblázat adja meg.

Generátoros		Fogyasztói	
hatásos	meddő	hatásos	meddő
+ P termelés (betáplálás)	+Q kapacítív (szolgáltatás)	+P fogyasztás (felvétel)	+Q induktív (nyelés)
-P fogyasztás (vételezés)	-Q induktív (nyelés)	-P termelés (visszatáplálás)	-Q kapacítív (szolgáltatás)

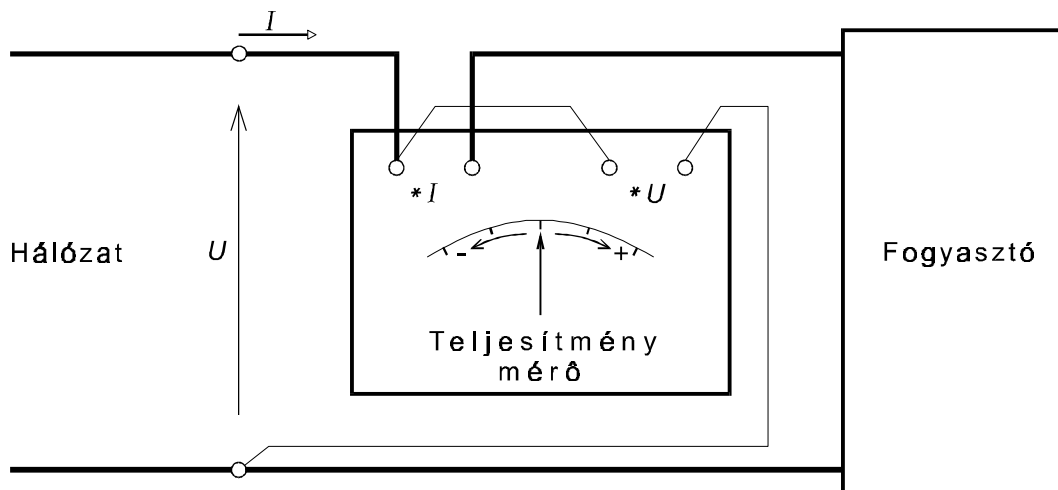
1-1 táblázat Teljesítmény előjelek értelmezése generátoros és fogyasztói rendszerben

Az alkalmazott irányrendszer lényege az, hogy egyrészt a tipikusnak tekinthető ohmos és induktív (motoros) fogyasztó által a fogyasztói irányrendszerben felvett hatásos és induktív meddőteljesítmény is pozitív, másrészt az ilyen fogyasztót ellátó generátornak a generátoros irányrendszerben szintén pozitív mind a termelt hatásos teljesítménye, mind pedig a kapacítív jellegű (túlgerjesztéses) meddőteljesítménye.

Azt, hogy a teljesítmény értelmezéséhez használt irányrendszer nem csak az összefüggések felírásához használatos valamiféle fikció jól érzékelteti az, hogy enélkül nem lehetséges a teljesítmény mérő bekötése olyan módon, hogy annak kitérése (polaritása) és a teljesítmény áramlás iránya közötti kapcsolat egyértelműen megoldható legyen. A teljesítmény mérőt [W-mérőt vagy var- mérőt (Volt-Amper-reaktív)] úgy kell bekötni, hogy a feltételezett teljesítmény áramlás irányába mutató áram az áramkapocs-pár jelölt kapcsánál lépjen be a mérőbe, a nagyobb potenciálúnak feltételezett (fázis) vezető pedig a feszültség kapocspár jelölt pontjához csatlakozzék. A teljesítmény mérőnek a fogyasztói pozitív irányrendszer szerinti bekötését az 1-10. ábra szemlélteti.



1-9. ábra Motoros fogyasztó és azt tápláló generátor hatásos és meddő teljesítményének előjele



1-10. ábra Teljesítmény mérő bekötése a fogyasztói iránynak megfelelően

Ennek megfelelően bekötött mérő pozitív irányú (polaritású) mérése W-mérő esetén határos teljesítmény felvételt (fogyasztást), var-mérő esetén pedig induktív meddő teljesítmény felvételt (meddő nyelést) jelent. A negatív polaritás - értelemszerűen - teljesítmény visszatáplálást, illetve kapacitív meddő felvételt (induktív meddő szolgáltatást) jelent.

A villamosenergia-rendszer alapesetére vonatkozó teljesítmény-viszonyokat az 1-11. ábra alapján érzékeltetjük. A generátor mint \bar{E}_G ideális feszültségforrás a vezeték R_v és X_v reaktanciáján fellépő néhány százalékos feszültségesést követően a fogyasztónál névleges körüli \bar{U} feszültséget biztosít.

A fogyasztásnak a határos teljesítményét leképező R ellenállásán és meddő teljesítményét leképező X reaktanciáján az \bar{U} feszültség hatására I_w wattos és I_m meddő áram jön létre:

$$I_w = \frac{\bar{U}}{R}; \quad I_m = \frac{\bar{U}}{jX} = -j \frac{\bar{U}}{X}$$

A fogyasztó teljesítménye:

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{U}\bar{I}^* = \bar{U} \left(\frac{\bar{U}^*}{R} + j \frac{\bar{U}^*}{X} \right) = \frac{\bar{U}\bar{U}^*}{R} + j \frac{\bar{U}\bar{U}^*}{X} = \frac{U^2}{R} + j \frac{U^2}{X}$$

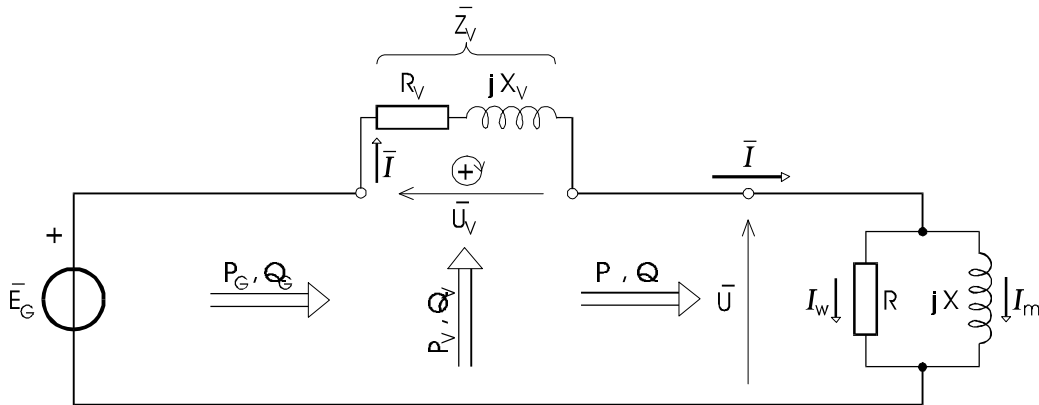
Tehát a fogyasztó feszültségkényszer alatt álló R ellenállásán és X reaktanciáján fellépő határos és meddő teljesítmény:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad \text{és} \quad Q = \frac{U^2}{X} \quad (1-11)$$

A reaktancia és ezzel a meddő teljesítmény előjele is pozitív induktív jellegű fogyasztó esetén és negatív kapacitív jellegű fogyasztó esetén.



a, egyvonalas vázlat



b, áramköri helyettesítés

1-11. ábra Generátor, vezeték és fogyasztó rendszer

A vezeték soros impedanciáján a fogyasztó \bar{I} árama hatására létrejövő

– feszültségesés:

$$\bar{U}_v = (R_v + jX_v)\bar{I}$$

– teljesítmény veszteség:

$$\bar{S} = P_v + jQ_v = \bar{U}_v \bar{I}^* = (R_v + jX_v)\bar{I}\bar{I}^* = R_v I^2 + jX_v I^2$$

Tehát a vezeték áramkényszer alatt álló soros R_v ellenállásán és X_v reaktanciáján fellépő hatásos és meddő veszteség:

$$P_v = R_v I^2 \quad \text{és} \quad Q_v = X_v I^2 \quad (1-12)$$

Megjegyzendő, hogy az (1-12) összefüggés szerinti teljesítményeket a fogyasztói pozitív irányrendszer szerint kell értelmezni, mivel \bar{U} és \bar{I} ennek felel meg (1-11b ábra). Ezért az általában induktív jellegű, pozitív előjelű vezeték reaktancia induktív meddő teljesítményt fogyaszt.

A generátor által szolgáltatott

$$\bar{S}_G = P_G + jQ_G = \bar{E}_G \bar{I}^* \quad (1-13)$$

teljesítmény és a fogyasztó, valamint a veszteség teljesítmények között az alábbi kapcsolatok írhatók fel:

$$P_G = P + P_v \quad \text{és} \quad Q_G = Q + Q_v \quad (1-14)$$

Egy energiarendszernek mind a hatásos, mind pedig meddő teljesítményére általában kimondható, hogy a fogyasztói- és veszteség teljesítmények összege egyenlő a generátoros teljesítmények összegével. Ez a megállapítás természetesen az 1-1. táblázat szerinti előjeles teljesítményekre vonatkozik.

1.3.2. Szimmetrikus háromfázisú rendszer

A villamos energia termelése, átvitele, elosztása és felhasználása szinte kizárólag váltakozó áramú, háromfázisú rendszerben történik. Ez alól csak a nagytávolságú, nagyfeszültségű, egyenáramú átvitel és a kis teljesítményű egyedi fogyasztók képeznek kivételt. Különleges, nem háromfázisú nagy fogyasztót jelentenek a váltakozó áramú villamos nagyvasutak is. A háromfázisú rendszer mellett szól mindenekelőtt az, hogy a térben 120 fokos irányokban elhelyezkedő, három tekercsből álló viszonylag egyszerű rendszerben - forgó mágneses mező hatására létrehozható az időben 120 fokkal eltolt háromfázisú elektromotoros-erő rendszer (szinkron generátor) - az időben 120 fokkal eltolt fázisáramok forgó mágneses mezőt eredményeznek, ami az egyszerű (aszinkron) motor alapja.

A háromfázisú rendszer előnyei teljes mértékben akkor jelentkeznek, ha a rendszer szimmetrikus. Ilyen előny az átvitelnél pl. az, hogy nem kell visszavezetés (negyedik ún. nullavezető), illetve ha van visszavezető (földelt csillagpontú rendszereknél ennek tekinthető a föld is), abban nem folyik áram és ezért veszteség sem keletkezik. További előny az időben (pillanatértékben is) állandó teljesítmény (lásd alábbi b) pontot). A fenti előnyök kihasználására arra törekednek, hogy maga az energiarendszer és annak terhelése is gyakorlatilag szimmetrikus legyen.

a) Feszültségek és áramok

Az *a*, *b*, és *c*, fázisokból és a földből mint referenciából álló háromfázisú rendszernek egy adott helyre vonatkozó feszültség és áram jellemzőit az 1-12. ábra szemlélteti. Megjegyezzük, hogy a fázisok azonosítására gyakran az R, S, T jelölést használják.

A fázisfeszültségek definíciószerűen az egyes fázisok és a föld közötti feszültségek. Az *a* fázis kezdő szögét nullának véve a fázisfeszültségek

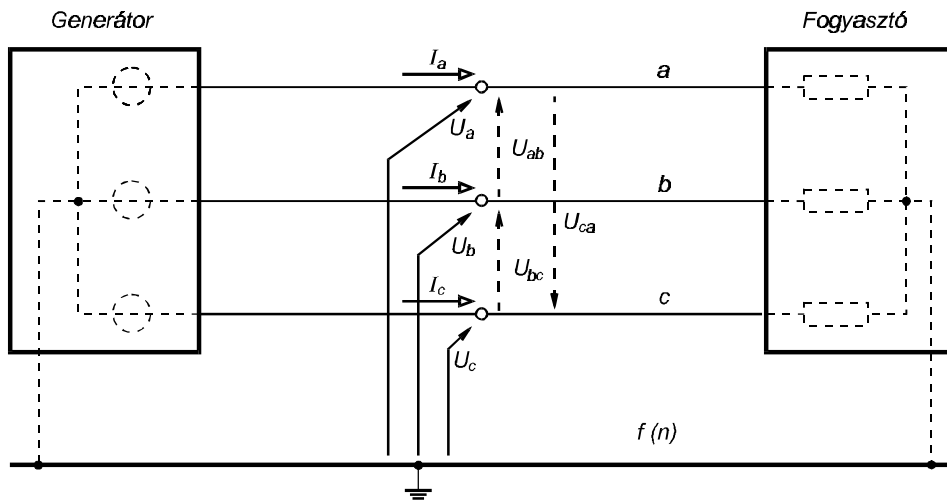
– időfüggvényei:

$$\begin{aligned} u_a(t) &= \sqrt{2} U_a \cos(\omega t) = \sqrt{2} U_f \cos(\omega t) \\ u_b(t) &= \sqrt{2} U_b \cos(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2} U_f \cos(\omega t - 120^\circ) \\ u_c(t) &= \sqrt{2} U_c \cos(\omega t + 120^\circ) = \sqrt{2} U_f \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (1-15)$$

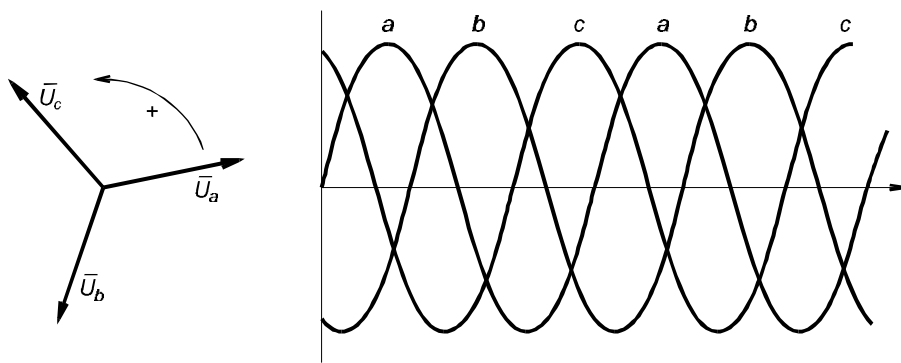
– fázorai:

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= U_a \angle 0^\circ \\ \bar{U}_b &= U_b / 120^\circ = U_f / -120^\circ \\ \bar{U}_c &= U_c / 120^\circ = U_f / 120^\circ \end{aligned}$$

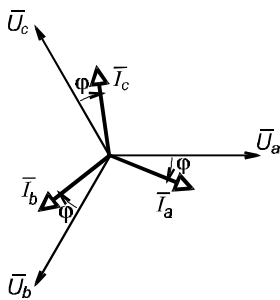
Az (1-15) és (1-16) összefüggésekben feltételeztük azt, hogy a feszültségek szimmetrikusak, azaz az 1-12b. ábra szerint



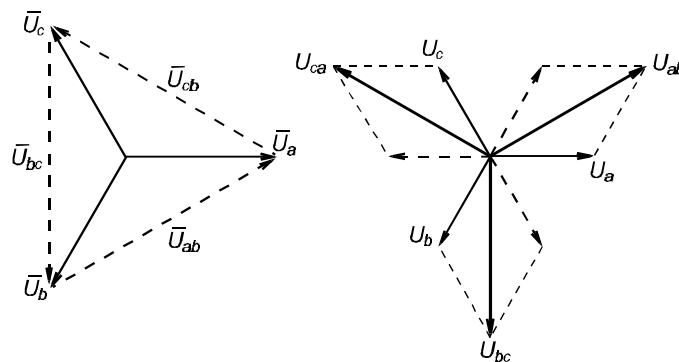
a, feszültségek és áramok



b, fázisfeszültségek fazora és időfüggvénye



c, áram és fázis feszültség fazorok



d, fázis és vonali feszültség fazorok

1-12. ábra Szimmetrikus háromfázisú rendszer feszültség- és áramviszonyai

– effektív értékük egyenlő

$$U_a = U_b = U_c = U_f$$

– a fázisok időben az a , b és c sorrendben követik egymást.

Az utóbbi követelmény teljesítése tulajdonképpen azt jelenti, hogy a feszültségrendszer nem csak szimmetrikus, hanem pozitív sorrendű is. A pozitív sorrendről a fázor ábra alapján úgy győződhetünk meg, hogy feltételezve a fázorok pozitív forgásirány szerinti forgását, azokat kívülről figyelve a fázisok követési sorrendje: $a - b - c$. A fázissorrend a gyakorlatban azért fontos, mert ez határozza meg a háromfázisú rendszer által létrehozott forgó mező forgási irányát. Ez azt jelenti, hogy ha egy motor kapcsaira a jelölést (pl. R, S, T) követő pozitív sorrendben (a , b , c) csatlakoztatjuk a hálózatot, akkor a motor a jelölt (pozitív) irányban fog forogni. Két fázis felcserélésekor, azaz negatív sorrend ($a-c-b$) szerinti táplálásnál a motor ellenkező irányban forog.

Az egyes fázisvezetőkben folyó áramok- időfüggvényei:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{2} I \cos(\omega t + \varphi) \\ i_b(t) &= \sqrt{2} I \cos(\omega t - 120 + \varphi) \\ i_c(t) &= \sqrt{2} I \cos(\omega t + 120 + \varphi) \end{aligned} \quad (1-17)$$

– fázorai:

$$\bar{I}_a = I_f / \underline{j} ; \quad \bar{I}_b = I_f / \underline{j} - 120^\circ \quad \bar{I}_c = I_f / \underline{j} + 120^\circ \quad (1-18)$$

Az áramok előzőek szerinti felírásakor felhasználtuk a feszültségek esetén ismertett szimmetria-feltételeket, valamint feltételeztük azt is, hogy az áramoknak a feszültségekhez képesti fázisszöge φ (1-12c ábra).

A háromfázisú rendszerben a fázisfeszültségeken kívül értelmezhetők a vezetők közötti ún. vonali feszültségek fázorai (1-12d ábra):

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ab} &= \bar{U}_a - \bar{U}_b = \sqrt{3} \bar{U}_a / 30^\circ \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_b - \bar{U}_c = \sqrt{3} \bar{U}_b / 30^\circ \\ \bar{U}_{ca} &= \bar{U}_c - \bar{U}_a = \sqrt{3} \bar{U}_c / 30^\circ \end{aligned} \quad (1-19)$$

ahol a második egyenlőségjelet követően már kihasználtuk azt, hogy a fázisfeszültségek szimmetrikusak (1-12d. ábra). Nyilvánvaló, hogy a vonali feszültségek fázorai is szimmetrikus pozitív sorrendű rendszert alkotnak. Az 1-12d. ábrából kiolvasható az is, hogy a vonali feszültségek U_v effektív értéke közötti kapcsolat:

$$U_v = \sqrt{3} U_f \quad (1-20)$$

Egy delta (háromszög) kapcsolású fogyasztó Z impedanciái a vonali feszültségekre vannak kapcsolva (1-13. ábra). A delta ágakon folyó áramok és a vonali áramok közötti - az 1-12. ábrából megállapítható - kapcsolat:

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{ab} \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{bc} \\ \bar{I}_c &= \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ca} \end{aligned} \quad (1-21)$$

A szimmetrikus viszonyok alapján a vonali és a delta ág áramainak effektív értékeire felírhatók:

$$I_a = I_b = I_c = I$$

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I$$

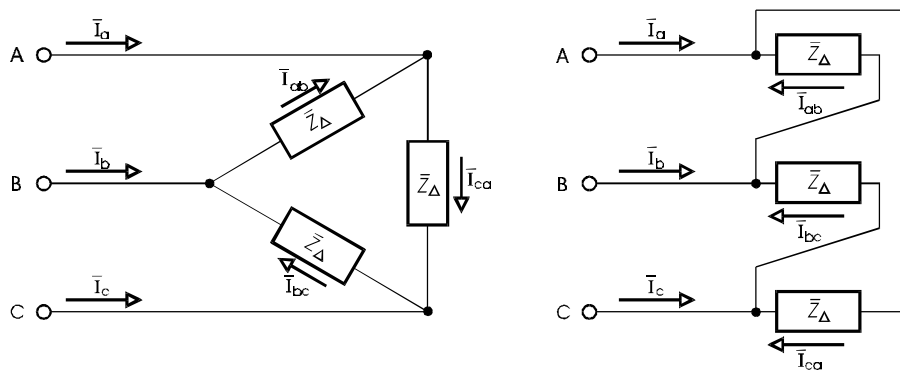
A delta ág árama és a vonali áram effektív értéke közötti - az 1-13b. ábrából egyszerűen megállapítható - kapcsolat:

$$I_{\Delta} = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (1.22)$$

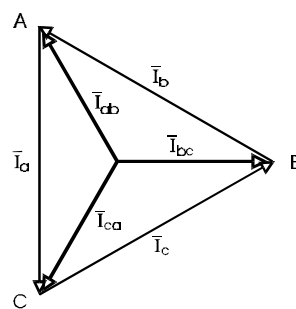
A delta ág impedanciájára felítható, hogy

$$Z_{\Delta} = \frac{U_v}{I_{\Delta}} = \frac{U_v}{I/\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}U_f}{I/\sqrt{3}} = 3 \frac{U_f}{I} = 3Z_Y$$

azaz az egyenértékű csillag-impedancia háromszorosa.



a. két szokásos áramkörti ábrázolás



b. áram fázorok

1-13. ábra Delta (háromszög) kapcsolású fogyasztó

A szimmetrikus háromfázisú rendszer feszültségeire és áramaira vonatkozó megállapítások az alábbiakban foglalhatók össze:

1. A három fázis áram-fázorainak vektoros összege nulla. Ezért a szimmetrikus háromfázisú rendszer nem igényel visszavezetést, vagy ha van visszavezetés, akkor az árammentes.

2. A szimmetrikus rendszert képező három fázisfeszültség fázorainak vektoros összege nulla. Ezért a csillagponti potenciál megegyezik a földpotenciállal.
3. A vonali feszültségek is szimmetrikus rendszert képeznek. A vonali feszültség U_v effektív értéke a fázisfeszültség U_f effektív értékének $\sqrt{3}$ -szorososa.

Fontos megjegyezni azt, hogy a hálózatok különböző feszültség szintjeit, valamint a villamos berendezések névleges feszültségét mindig a vonali feszültséggel adják meg. Ezért a továbbiakban az index nélküli U a vonali feszültséget, azaz az $U = \sqrt{3} U_f$ értéket, jelenti.

b) Teljesítmény összefüggések

A háromfázisú teljesítmény időfüggvényét az egyes fázisok teljesítmény-időfüggvényeinek az összege adja meg a következő összefüggés szerint:

$$p_{3f}(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) \quad (1-23)$$

A szimmetrikus rendszerre vonatkozó (1.15) szerinti feszültség- és (1.17) szerinti áram időfüggvényeket behelyettesítve, az 1.3.1.pont szerinti egyfázisú teljesítmény-összefüggéseket az egyes fázisteljesítményekre alkalmazva az összegezés után a háromfázisú teljesítményre az alábbi eredmény adódik:

$$p_{3f}(t) = P_{3f} = 3U_f I \cos\varphi = 3P_{1f} \quad (1-24)$$

Megállapítható, hogy a háromfázisú pillanatnyi teljesítmény az időben állandó, nagysága pedig az egyfázisú $P_{1f} = U_f I \cos\varphi$ hatásos teljesítménynek a háromszorosa.

Az a tény, hogy a háromfázisú teljesítménynek nincs lengő része, azt sugallja, hogy a háromfázisú rendszerben nincs meddő teljesítmény, vagy legalábbis a meddő teljesítménynek nincs jelentősége. A valódi helyzet azonban az, hogy a háromfázisú rendszer három egyfázisú hálózatnak az együttese, ezért az egyfázisú hálózatra leszármaztatott (1-5) összefüggés az egyes fázisokra külön-külön alkalmazható. Egy háromfázisú motor teljesítményét fázisonként wattos és meddő mérő kapcsolással mérve megállapítható az időben 2-szeres frekvenciával változó hatásos teljesítmény és a lengő jellegű meddő teljesítmény. A mért hatásos teljesítményeket a motor az egyes fázisokból veszi fel. A légrés teljesítményben már a három fázis hatásos teljesítményének az eredője jelenik meg. Ez motor esetén azt jelenti, hogy a három fázis által együtt létrehozott légrés teljesítmény időben állandó, tehát a motor nyomatéka is állandó. A fázisonkénti meddő teljesítmények az egyes fázisok tekercseiben folyó áramhoz tartozó mágneses térben tárolt energiáknak felelnek meg. A szimmetrikus háromfázisú rendszernek az a különleges tulajdonsága, hogy minden pillanatban a felépülő és lebomló terekkel kapcsolatos meddő teljesítmény előjelhelyes összege nulla.

A fenti megfontolás szerint a háromfázisú meddő teljesítmény az (1-8) összefüggés szerinti egyfázisú meddő teljesítmény háromszorosa, azaz:

$$Q_{3f} = 3Q_f = -3U_f I \sin\varphi \quad (1-25)$$

A háromfázisú hatásos és meddő teljesítmény komponensekből képzett háromfázisú komplex látszólagos teljesítmény:

$$\bar{S}_{3f} = P_{3f} + jQ_{3f} \quad (1-26)$$

Ennek abszolút értéke, a háromfázisú látszólagos teljesítmény:

$$S_{3f} = 3S_f = 3U_f I \quad (1-27)$$

A fázisfeszültséget az $U_f = U/\sqrt{3}$ - kifejezés felhasználásával a vonali feszültséggel helyettesítve, a háromfázisú teljesítmény összefüggések:

– a látszólagos teljesítmény:

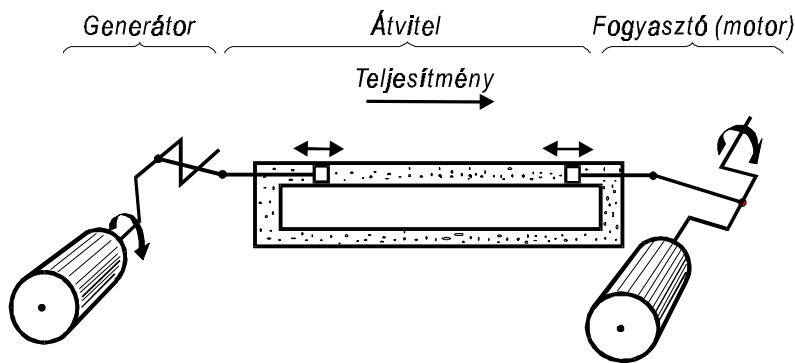
$$S_{3f} = \sqrt{3} U I \quad (1-28a)$$

– a hatásos teljesítmény:

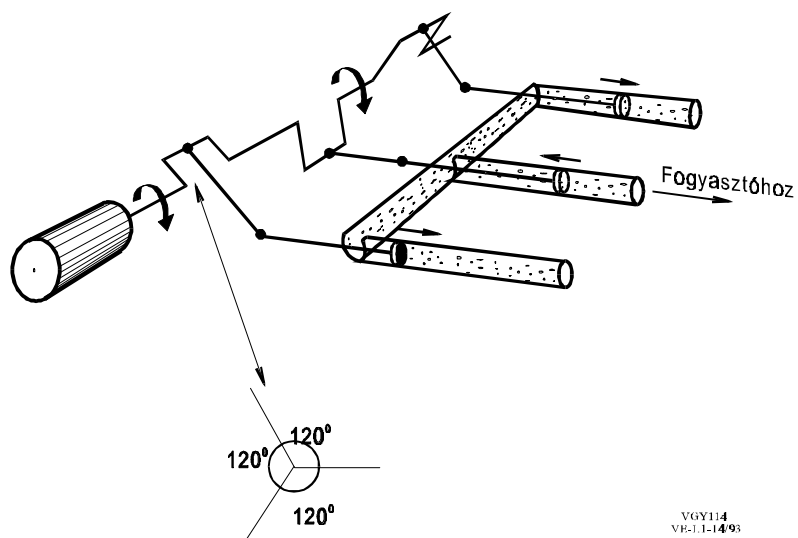
$$P_{3f} = \sqrt{3} U I \cos\varphi \quad (1-28b)$$

– a meddő teljesítmény:

$$Q_{3f} = - \sqrt{3} U I \sin\varphi \quad (1-28c)$$



a) egyfázisú rendszer



b) háromfázisú rendszer

1-14.ábra Forgattyús tengelyből és hidraulikus átvitelből álló analóg rendszer

Az egy- és háromfázisú hatásos és meddő teljesítmények jól érzékeltehetők az 1-14. ábra szerinti hidraulikus analógiák alapján.

Az állandó szögsebességgel forgó generátor oldali forgattyús tengelyhez csatlakozó dugattyú szinuszosan változó sebességű oszcilláló mozgást végez. Ezt továbbítja a hidraulikus átvitel, majd a fogyasztói oldali dugattyú és forgattyús tengely egyenletes forgómozgást eredményez.

Egyfázisú átvitelnél (1-14a. ábra) az átvitt hatásos teljesítmény a dugattyú sebességváltozása miatt kétszeres frekvenciával ingadozik. A folyadék - mint közvetítő közeg - mozgási energiája is kétszeres frekvenciával leng. Ez az energialengés képviseli a nulla átlagú meddő teljesítményt.

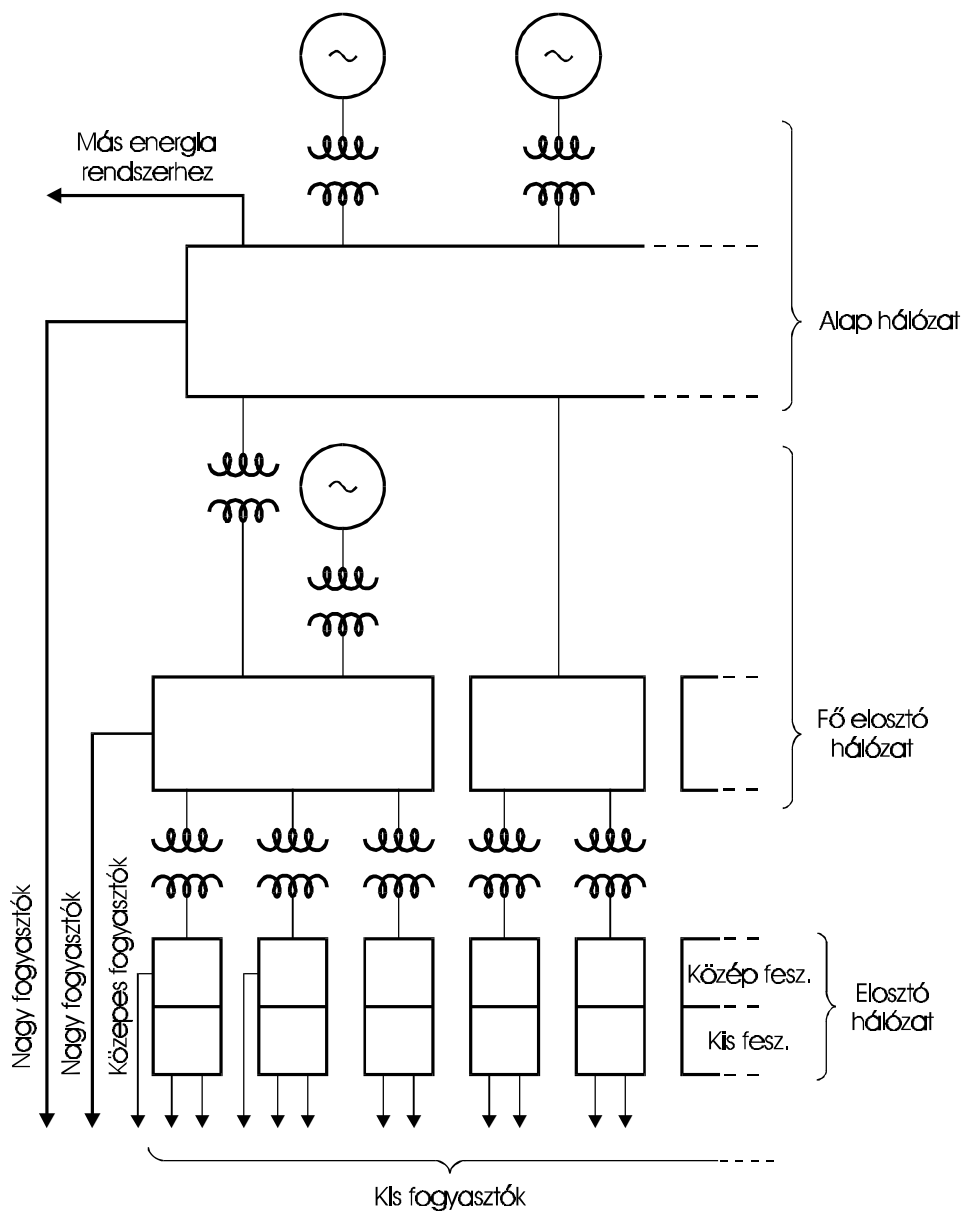
A háromfázisú, szimmetrikus, azaz 120 fokra elékelt forgattyús tengelyű, azonos keresztmetszetű csövekkel üzemelő, háromfázisú hidraulikus rendszer három egyfázisú átvitel együttesének tekinthető. Ilyen esetben a három csőben együttesen áramló folyadék minden pillanatban nulla. Ezért a visszavezető cső elhagyható (1-14b. ábra).

Az egyes csövek átvitt hatásos teljesítménye most is időben változó, azonban ezek eredője a fogyasztói forgattyús tengelyen állandó teljesítményt eredményez. A meddő teljesítményt jelentő kinetikus energia az egyes csövekben az egyfázisú átvitelhez hasonlóan leng. A három cső együttes kinetikus energia felvétele és hatása egymással egyenlő, azaz eredőjük minden pillanatban nulla.

2. A VILLAMOSENERGIA-ÁTVITEL ALAPKÉRDÉSEI

2.1. A villamos hálózat felépítése, feszültség szintjei

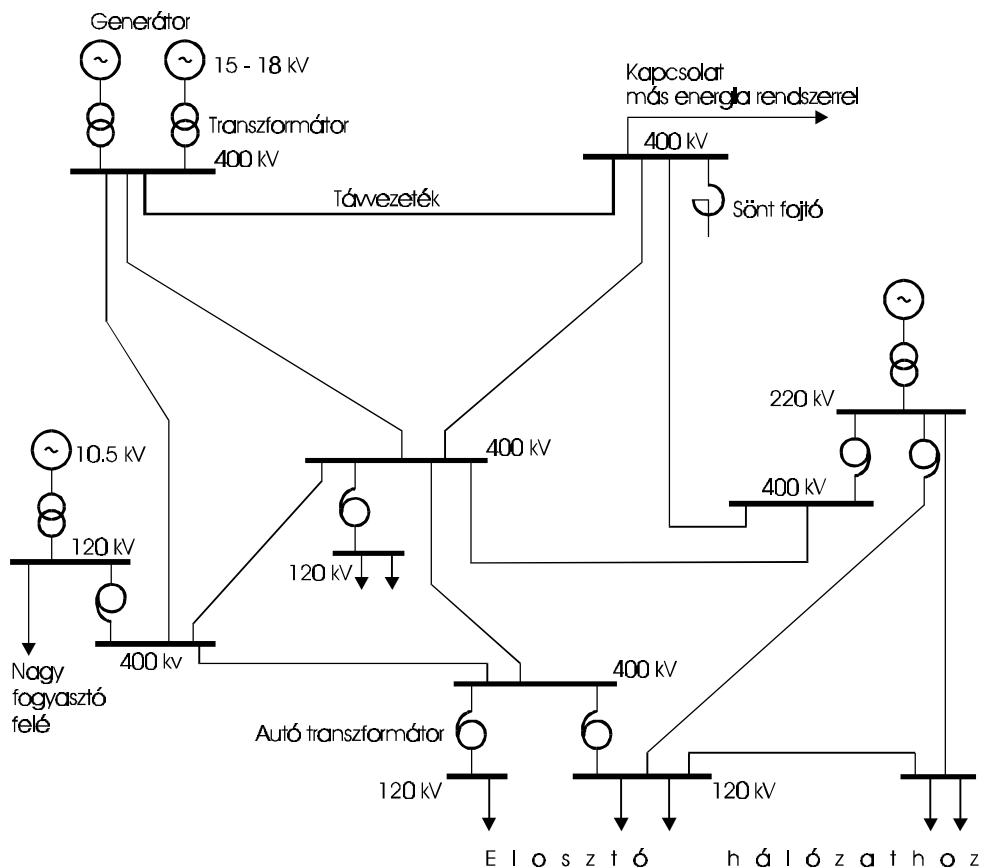
A villamos energiát nagy mennyiségben előállító szinkron generátorok hajtógépei nagy teljesítményű egységekben működnek hatásosan. A ma használt generátorok teljesítménye több 100 MW, de nem ritka az 1000 MW feletti egység teljesítmény sem. A segédüzemi létesítmények, például a hűtővíz rendszer, jobb kihasználása és ezzel a költségek csökkentése érdekében több generátor egységből álló erőműveket létesítenek. Az így létrejövő több 1000 MW nagyságú erőművek a villamosenergia-termelésben nagyobb koncentrátságot jelentenek, mint a fogyasztás koncentrátsága.



2-1. ábra Villamosenergia-hálózat szerkezete

Az erőművek több ok (primer energia, mint szén, víz, vagy hűtővíz rendelkezésre állása, környezeti szempontok) miatt nem telepíthetők a fogyasztók közelébe. Ez szükségessé teszi a nagy teljesítményű villamosenergia-átvitelt. Gazdasági, környezeti és megbízhatósági okok azt kívánják, hogy a különböző erőművek hálózaton keresztül működjenek együtt. Az ilyen módon összegyűjtött energiát kell a fogyasztókhoz eljuttatni és elosztani.

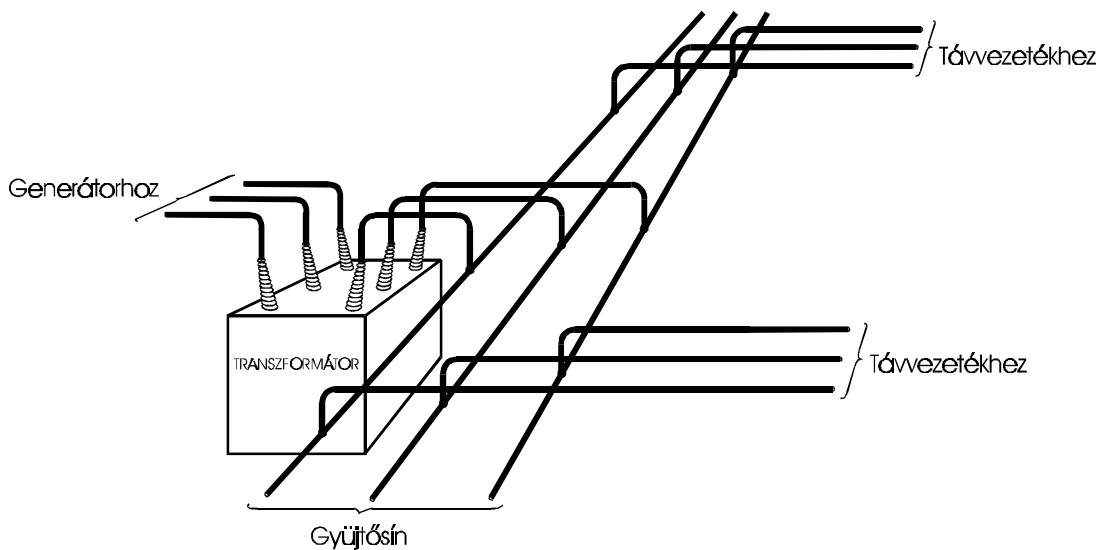
A leírt feltételeket kielégítő villamosenergia-hálózat szerkezetét mutatja a 2-1. ábra. A nagyfeszültségű alaphálózathoz csatlakoznak a nagy erőművek és az együttműködő energiarendszerek közötti - sokszor nemzetközi - összekötő vezetékek, a rendszerszintű feszültségszabályozást végző meddőteljesítmény-források (sönt kondenzátorok és fojtók), valamint a nagy teljesítményű fogyasztók. Az alaphálózat mindig többszörösen hurkolt hálózat, amelynek az ún. egyvonalas kapcsolását a 2-2. ábra szemlélteti a magyar feszültségszintek feltüntetésével. Az egyes hálózatelemek, vezetékek, transzformátorok, stb. egymáshoz az állomásokban gyűjtősíneken, mint csomópontokon át csatlakoznak (2-3. ábra).



2-2. ábra Hurkolt alaphálózat

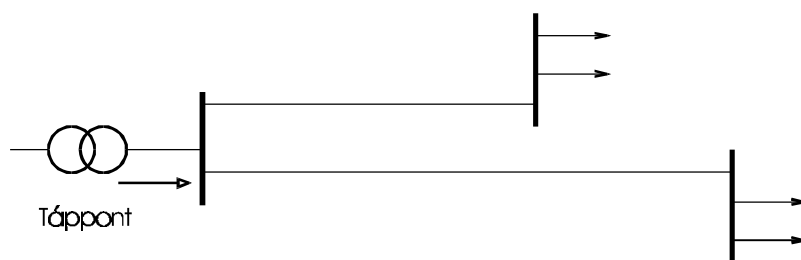
Az alaphálózathoz a fogyasztói táppontokhoz az energiaelosztás a nagyfeszültségű -magyar hálózaton 120 kV-os - főelosztó hálózaton és a közepfeszültségű elosztó hálózaton történik. A magyar közepfeszültségű hálózat nagy városok belterületén 10 kV-os kábelhálózat, külterületen, valamint a kisebb városokban 20 kV-os kábel és szabadvezeték, vidéken pedig 20 kV-os szabadvezeték hálózat. A nagy ipari fogyasztók önálló 120 kV-os vételezéssel és 6 kV-os elosztó

hálózattal rendelkeznek. Az egyedi - néhány kW-tól néhány 100 kW-ig terjedő - kis fogyasztók ellátása a 0,4 kV-os kisfeszültségű hálózatról történik.



2-3. ábra Alállomási gyűjtősín vázlata

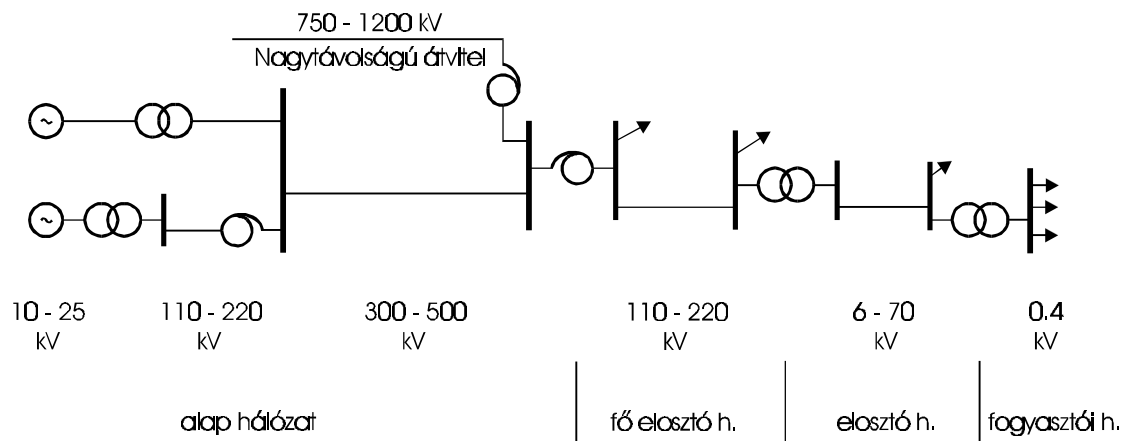
Az elosztó hálózatok legtöbbször a 2-4. ábra szerinti sugaras felépítésűek. A sugaras hálózat esetén az egyes vezetékeken az energia mindig a tápponttól a fogyasztó felé áramlik, míg a hurok hálózat vezetékeire nincs kitüntetett áramlási irány.



2-4. ábra Sugaras hálózat

Megjegyezzük, hogy az alap- és főelosztó hálózat közötti határvonal nem teljesen éles. A hálózat - a közúti hálózathoz hasonlóan - változik, az alaphálózati vezetékek a későbbiekben főelosztó hálózati szerepet tölthetnek be.

A hálózati szerepkörökről és azokról a feszültségszintekről, amelyeken át a villamos energia a generátortól eljut a fogyasztóig a 2-5. ábra ad áttekintést.



2-5. Ábra Hálózati szerepkörök és feszültségszintek

A különböző feszültségszintű vezetékek átviteli képességének jellemzőit a 2-1. táblázat érzékelteti.

U_n kV	I A	S MVA	l_{max} km
400	1000	1000	500
120	500	100	60
20	200	10	10
0.4	100	0.1	0.5

2-1. táblázat: Különböző feszültségszintű távvezetékek átviteli jellemzői

2.2. Háromfázisú hálózatok számítása szimmetrikus összetevőkkel

2.2.1. A szimmetrikus összetevők alkalmazásának alapja

Egy szinuszosan váltakozó **eme** forrásfeszültséggel táplált áramkörben az áram a forrás szerinti alapharmonikus komponensen kívül általános esetben tartalmazhat egyirányú (gyakran helytelenül egyenáramúnak mondott) és az alapharmonikus egészszámú többszöröseinek megfelelő frekvenciájú ún. felharmonikus összetevőket. A fázisáram egyirányú összetevője ki- vagy bekapcsolási jelenségek következménye és viszonylag gyorsan csillapodik. A felharmonikusokat a nemlineáris áramköri elemek (pl. mágneses telítődés, áramirányító) okozzák, és általában a nagyobb frekvenciákhoz (növekvő felharmonikus rendszámhoz) egyre kisebb amplitúdó tartozik.

Háromfázisú áramkörben ez az *a-b-c* fázisra egyaránt elmondható. Az alap- és felharmonikus komponensek komplex fazorokkal írhatók le, mindegyik fázisra és mindegyik harmonikusra

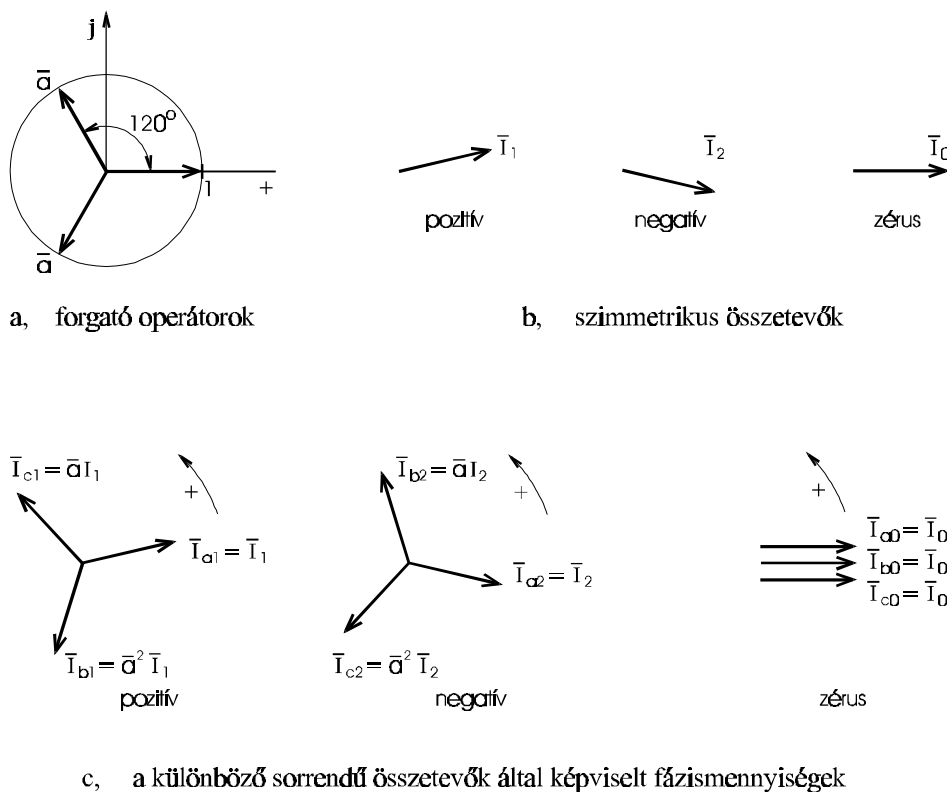
külön-külön. Ezen fázorok amplitúdója (és fázisszöge) általában az időben változó, az egyes frekvenciájú pillanatértékek burkológörbéje ezekkel leírható.

A háromfázisú villamosenergia-hálózatokban az ipari frekvenciájú alapharmonikus (50 Hz-es) áram és feszültség a domináns, ez a teljesítményátvitel meghatározója, ezért a gyakorlati esetek többségében csak az alapharmonikus viszonyokat vizsgáljuk.

A háromfázisú alapharmonikus \bar{I}_a, \bar{I}_b és \bar{I}_c áramrendszer és \bar{U}_a, \bar{U}_b és \bar{U}_c feszültségrendszer általában nem teljesen szimmetrikus rendszer, mert a háromfázisú átviteli elemek (távvezetékek) geometriailag aszimmetrikus elrendezése és esetenként a fázisok közötti egyenlőtlen terhelés az áramokban (feszültségekben) is kismértékű aszimmetriát hoz létre. A csak egy vagy két fázist érintő meghibásodások (zárlat vagy áramkör-megszakadás) jelentős áram (feszültség) aszimmetriát okoznak a hibahelyen és annak környezetében.

2.2.1.1. Áramok és feszültségek szimmetrikus összetevői

Az \bar{I}_a, \bar{I}_b és \bar{I}_c fázorok csak háromféle módon képezhetnek szimmetrikus rendszert az $a-b-c$ fázisokra vonatkozóan (2-6. ábra).



2-6. ábra A szimmetrikus összetevő fázorok szemléltetése

1) pozitív sorrendű áramrendszer:

$$\bar{I}_{a1} = \bar{I}_1; \quad \bar{I}_{b1} = \bar{a}^2 \bar{I}_1 \quad \bar{I}_{c1} = \bar{a} \bar{I}_1$$

ahol \bar{I}_1 a pozitív sorrendű áram (fázor)

$\bar{a} = e^{j120^\circ}$ szögforgató egységvektor (operátor)

és ez a normál üzemi állapot uralkodó jellemzője

(pozitív sorrend: forgásirány szerinti a - b - c sorrend)

2) negatív sorrendű áramrendszer

$$\bar{I}_{a2} = \bar{I}_2; \quad \bar{I}_{b2} = \bar{a}\bar{I}_2 \quad \bar{I}_{c2} = \bar{a}^2\bar{I}_2$$

ahol \bar{I}_2 a negatív sorrendű áram (fázor)

(negatív sorrend: forgásirány szerinti a - c - b sorrend)

3) zérus sorrendű áramrendszer

$$\bar{I}_{a0} = \bar{I}_0 \quad \bar{I}_{b0} = \bar{I}_0 \quad \bar{I}_{c0} = \bar{I}_0$$

ahol \bar{I}_0 a zérus sorrendű áram (fázor)

(zérus sorrend: azonos fázishelyzet az a - b - c -ben)

Az előzőekből következik, hogy az \bar{I}_a, \bar{I}_b és \bar{I}_c áramok felbonthatók az előbbi három - az a - b - c fázisokra már szimmetrikus - ú.n. szimmetrikus összetevőre. Ez a felbontás a definiált áramrendszerekből származtatható:

$$\begin{aligned} - \text{ pozitív sorrend} & \quad \bar{I}_1 = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}\bar{I}_b + \bar{a}^2\bar{I}_c) \\ - \text{ negatív sorrend} & \quad \bar{I}_2 = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}^2\bar{I}_b + \bar{a}\bar{I}_c) \\ - \text{ zérus sorrend} & \quad \bar{I}_0 = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \end{aligned} \quad (2-1)$$

A szimmetrikus összetevőkből a fázisáramok a fenti egyenletek a - b - c áramokra történő megoldásából, illetve a definiált áramrendszerek szuperpozíciójából határozhatók meg:

$$\begin{aligned} - \text{ a fázis} & \quad \bar{I}_a = (\bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2) \\ - \text{ b fázis} & \quad \bar{I}_b = (\bar{I}_0 + \bar{a}^2\bar{I}_1 + \bar{a}\bar{I}_2) \\ - \text{ c fázis} & \quad \bar{I}_c = (\bar{I}_0 + \bar{a}\bar{I}_1 + \bar{a}^2\bar{I}_2) \end{aligned} \quad (2-2)$$

Látható, hogy valamely szimmetrikus összetevőjű sorrendben a fázisáramok effektív értéke azonos, a fázorok közötti fázisszög pedig az adott sorrendhez kötődik, továbbá a sorrendi összetevők meghatározásához az a fázist vettük kitüntetett szerepűnek (sorrendi referenciának). Az elmondottak értelemszerűen vonatkoznak a feszültségekre is.

A pozitív (és negatív) sorrendű áramösszetevő az a - b - c fázisokon belül záródik ($1 + a + a^2 = 0$), külső visszavezetést nem vesz igénybe. Ezzel ellentétben az I_0 zérus sorrendű összetevő csak külső visszavezetés(ek) jelenléte esetén alakulhat ki és ez(ek)en együttesen

$$3\bar{I}_0 = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c$$

áram folyik. (A földvisszavezetésre jutó $3\bar{I}_0$ hányad - fizikai törvényből adódóan - a fázisvezetők nyomvonalát követi.)

A negatív sorrendű áram a háromfázisú villamos gépek forgórészében káros túlmelegedést okozhat (a forgásiránnyal ellentétesen forgó mágneses mező az állórészben). A $3\bar{I}_0$ zérus sorrendű áram földben folyó részének mágneses tere az együtthaladó vezetékek és a föld által képezett hurokban **eme**-t indukál, a földelések környezetében pedig potenciálemelkedést okoz.

Az U_0 zérus sorrendű feszültség, mivel mindhárom fázis feszültségében azonosan megjelenik, az ezek különbségeként értelmezett vonali feszültségekből kiiktatódik, viszont a fázisfeszültségekből (fazorokból) képezhető háromszög súlypontjának azaz a csillagponti feszültségnek az áthelyeződését eredményezi. Ez - a nem hatásosan földelt rendszerekben (lásd 2.4.fejezet) - a földpotenciálhoz viszonyított ún. csillagpont eltolódást eredményez és jelentős (alapharmonikus) túlfeszültségeket okozhat.

Egy szimmetrikus háromfázisú átviteli és fogyasztói rendszerben csak pozitív sorrendű áramok és feszültségek vannak (pontosabban az *a-b-c* áramoknak és feszültségeknek csak pozitív sorrendű összetevője van). A negatív és/vagy zérus sorrendű áram- ill. feszültség- összetevő jelenléte az *a-b-c* áram ill. feszültség aszimmetriájára utal, annak mértéke ezekből határozható meg.

Megjegyezzük, hogy a háromfázisú rendszer más jellegű három összetevőre is felbontható, de a zérus sorrendű összetevő mindig szerepel. (Az összetevőkre bontás általános elméletével most nem foglalkozunk.)

A háromfázisú villamosenergia-átvitel normál üzemi viszonyait az alapharmonikus pozitív sorrendű áramok és feszültségek, illetve a pozitív sorrendű áramkörök - vagy áramköri elemi modellek - segítségével vizsgálhatjuk.

2.2.1.2. Egyfázisú sorrendi hálózatok

a) Leszármaztatás

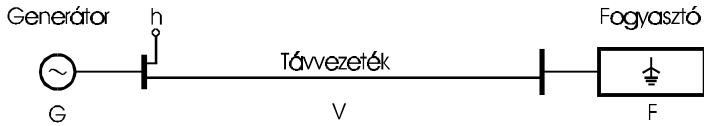
Egy háromfázisú hálózatnak a szimmetrikus összetevőkre vonatkozó sorrendi hálózatokkal történő leképezését a 2-7a. ábra szerinti távvezetékkel összekapcsolt generátor és fogyasztó rendszerén mutatjuk be. A rendszer háromfázisú áramköre a 2-7b. ábrán látható. Az *a* fázis és a föld által alkotott hurokra felírható feszültségegyenlet:

$$\bar{E}_{a1}^G - jX^G \bar{I}_a - [\bar{Z}_{aa}^V \bar{I}_a + \bar{Z}_{ab}^V \bar{I}_b + \bar{Z}_{ac}^V \bar{I}_c] - [\bar{Z}_a^F \bar{I}_a + \bar{Z}_n^F (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c)] = 0 \quad (2-3)$$

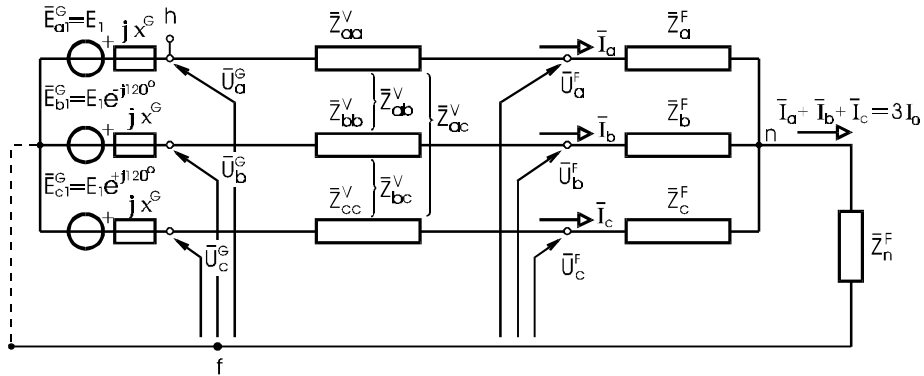
A *b* és *c* fázisokra ugyanilyen egyenletek írhatók fel az indexek értelemszerű megváltoztatásával. Az egyes tagok rendre:

- \bar{E}_{a1}^G a generátor *a* fázisában működő elektromotoros erő (eme). Feltételezzük, hogy az *a-b-c* **eme** rendszer szimmetrikus pozitív sorrendű.
- \bar{U}_a^G a generátor kapocsfeszültsége, amely a generátor - szimmetrikusnak feltételezett - X^G reaktanciáján bekövetkező feszültségeséssel különbözik az **eme**-től:

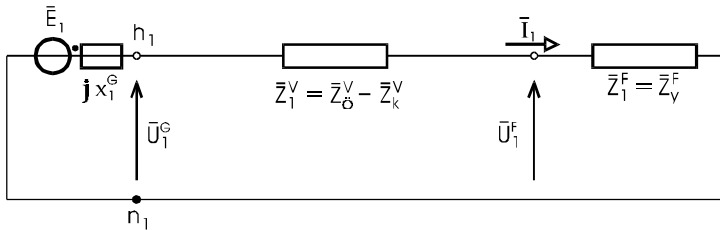
$$\bar{U}_a^G = \bar{E}_{a1}^G - jX^G \bar{I}_a \quad (2-4a)$$



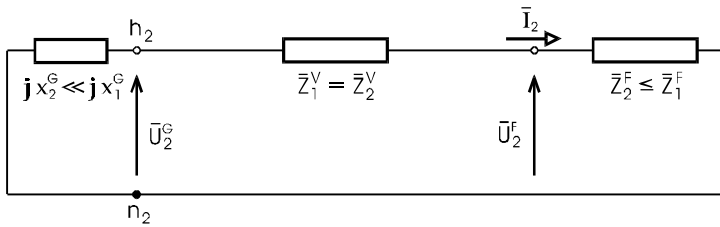
a, Egyvonalas kapcsolási vázlat.



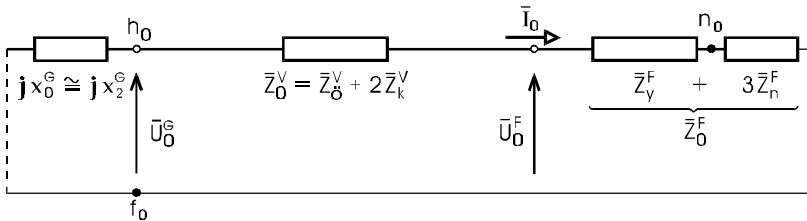
b, Háromfázisú hálózat.



c, Pozitív sorrendű hálózat.



d, Negatív sorrendű hálózat.



e, Zérus sorrendű hálózat.

2-7.ábra Helyettesítő kapcsolások

- \bar{V}_a a vezeték soros impedanciáján az a fázis-föld hurokban fellépő feszültségesés

$$\bar{V}_a = \bar{U}_a^G - \bar{U}_a^F = \bar{Z}_{aa}^V \bar{I}_a + \bar{Z}_{ab}^V \bar{I}_b + \bar{Z}_{ac}^V \bar{I}_c \quad (2-4b)$$

ahol \bar{Z}_{aa} az a fázis-föld hurok önimpedanciája, \bar{Z}_{ab} és \bar{Z}_{ac} rendre az a fázisnak a b és c fázisokhoz képesti föld-visszavezetétes kölcsönös impedanciái.

- \bar{U}_a^F a fogyasztó kapocsfeszültsége az a fázisban

$$\bar{U}_a^F = \bar{Z}_a^F \bar{I}_a + \bar{Z}_n^F (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \quad (2-4c)$$

ahol \bar{Z}_a^F a fogyasztó csillaghelyettesítésének az a fázis kapcsa és a csillagpont közötti impedanciája, \bar{Z}_n^F pedig a csillagpont és a föld közötti impedancia.

A hálózatelemeket szimmetrikusnak feltételezve, felírható:

- a vezetékre bevezethető a fázis-föld hurkok önimpedanciája:

$$\bar{Z}_{\bar{o}} = \bar{Z}_{aa}^V = \bar{Z}_{bb}^V = \bar{Z}_{cc}^V \quad (2-5a)$$

és kölcsönös impedanciája

$$\bar{Z}_k^V = \bar{Z}_{ab}^V = \bar{Z}_{bc}^V = \bar{Z}_{ca}^V$$

- a fogyasztóra pedig a csillagimpedancia

$$\bar{Z}_y = \bar{Z}_a^F = \bar{Z}_b^F = \bar{Z}_c^F \quad (2-5b)$$

Ezzel a (2-4b. és c.) összefüggések az alábbi egyszerűbb alakban írhatók:

- a vezeték feszültségesése az a fázisban:

$$\bar{V}_a = \bar{Z}_{\bar{o}}^V \bar{I}_a + \bar{Z}_k^V (\bar{I}_b + \bar{I}_c) \quad (2-6a)$$

- a fogyasztó kapocsfeszültsége az a fázisban

$$\bar{U}_a^F = \bar{Z}_y^F \bar{I}_a + \bar{Z}_n^F (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \quad (2-6b)$$

Ezeket a (2-3) összefüggésbe helyettesítve, a szimmetrikus passzív hálózat a fázisára vonatkozó feszültség-egyenlet:

$$\bar{E}_{a1}^G - jX^G \bar{I}_a - [\bar{Z}_{\bar{o}}^V \bar{I}_a + \bar{Z}_k^V (\bar{I}_b + \bar{I}_c)] - [\bar{Z}_y^F \bar{I}_a + \bar{Z}_n^F (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c)] = 0 \quad (2-7)$$

Ha a hálózat valamely pontjában előálló aszimmetria (pl.aszimmetrikus zárlat) miatt, az áramrendszer aszimmetrikussá válik, akkor a teljes háromfázisú rendszer feszültségviszonyainak leírásához a (2-7) összefüggéseket a b és c fázisra is meg kell adni, ami - a passzív hálózatot továbbra is szimmetrikusnak feltételezve - a fázisindexek értelemszerű felcserélésével megtehető.

A háromfázisú rendszer aszimmetrikus áramokra vonatkozó megoldására az alábbi két lehetőség van:

- 1) magát a fázis-egyenletrendszert oldjuk meg, ami a mindhárom fázisra megadott (2-7) szerinti - a fázisok közötti csatolásokat is tartalmazó - 3 komplex egyenletből áll,
- 2) a 2.2.1. pont szerinti szimmetrikus összetevőket felhasználva a három szimmetrikus összetevő rendszert oldjuk meg úgy, hogy:
 - a) a 3 aszimmetrikus áramot (és feszültséget) a 3 szimmetrikus összetevőjével adjuk meg,

b) a háromfázisú csatolt hálózatot a 3 szimmetrikus rendszerre vonatkozó egyfázisú sorrendi hálózatokkal helyettesítjük és az ezekre vonatkozó három, egymással nem csatolt, komplex egyenletet oldjuk meg,

c) a megoldásként kapott szimmetrikus összetevőkből előállítjuk a fázismennyiségeket.

Az egyes szimmetrikus összetevőkre vonatkozó áramköri helyettesítő kapcsolások a (2-6) és (2-7) fázisegyenletekből származtathatók le úgy, hogy azokba az egyes szimmetrikus összetevő áramok által képviselt fázisáramokat helyettesítjük és megállapítjuk az ezekkel szembeni impedanciákat.

b) Pozitív (negatív) sorrendű hálózat

A szimmetriából következőleg

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0 \quad \text{illetőleg} \quad \bar{I}_b + \bar{I}_c = -\bar{I}_a = -\bar{I}_1 \quad (2-8)$$

A vezetékre vonatkozó (2-6a) összefüggésből (2-8) figyelembevételével az alábbi összefüggéseket kapjuk:

– a pozitív sorrendű feszültségesés

$$\bar{V}_a = \bar{V}_1 = (\bar{Z}_\sigma^V - \bar{Z}_k^V) \bar{I}_1 \quad (2-9a)$$

$$\bar{Z}_1^V = \frac{\bar{V}_1}{\bar{I}_1} = \bar{Z}_\sigma^V - \bar{Z}_k^V \quad (2-9b)$$

Hasonlóan a fogyasztóra vonatkozó (2-6b) összefüggésből (2-8) figyelembevételével:

– a pozitív sorrendű kapcsolófeszültség

$$\bar{U}_a^F = \bar{U}_1^F = \bar{Z}_y^F \bar{I}_1 \quad (2-10a)$$

– a pozitív sorrendű impedancia pedig

$$\bar{Z}_1^F = \frac{\bar{U}_1^F}{\bar{I}_1} = \bar{Z}_y^F \quad (2-10b)$$

Megállapítható az, hogy a pozitív sorrendű impedanciában \bar{Z}_n nem szerepel, ami azzal magyarázható, hogy (2-8) szerint nem folyik rajta áram, ezért nagyságának, sőt alkalmazásának, illetve földelésének nincs jelentősége. Belátható, hogy a távvezetéknek a (2-9b) összefüggés szerinti pozitív sorrendű impedanciájában sem szerepel a földvisszavezetés impedanciája, (\bar{Z}_σ és \bar{Z}_k földre vonatkozó részei egymást kiejtik).

A (2-4a), a (2-9) és a (2-10) szerint értelmezett pozitív sorrendű hálózatelemekkel a 2-7c. ábra szerinti pozitív sorrendű helyettesítő vázlat adható meg.

A negatív sorrendű hálózat (2-7d.ábra) topológiája megegyezik a pozitív sorrendűvel, de a generátor *eme*-jét rövidzár hidalja át, a forgógépek negatív sorrendű impedanciája pedig az armatúra szórási impedanciájával közel megegyező értékű, ami a pozitív sorrendű impedanciánál lényegesen kisebb (lásd a szinkron és aszinkron géppel foglalkozó fejezeteket).

c) Zérus sorrendű hálózat

A zérus sorrendű áramokra vonatkozó $\bar{I}_a = \bar{I}_b = \bar{I}_c = \bar{I}_0$ feltételt behelyettesítve a (2-4a)-ba, a vezetékre az alábbi összefüggéseket kapjuk:

- a zérus sorrendű feszültségesség

$$\bar{V}_a = \bar{V}_0 = (\bar{Z}_\sigma^V + 2\bar{Z}_k^V) \bar{I}_0 \quad (2-11a)$$

- a zérus sorrendű impedancia, definíciószerűen

$$\bar{Z}_0^V = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \bar{Z}_\sigma^V + 2\bar{Z}_k^V \quad (2-11b)$$

Hasonlóan a zérus sorrendű áramfeltételt behelyettesítve a (2-6b)-be, a fogyasztóra az alábbi összefüggéseket kapjuk:

- a zérus sorrendű kapocsfeszültség

$$\bar{U}_a^F = \bar{U}_0^F = (\bar{Z}_y^F + 3\bar{Z}_n) \bar{I}_0 \quad (2-12a)$$

- a zérus sorrendű impedancia pedig

$$\bar{Z}_0^F = \frac{\bar{U}_0^F}{\bar{I}_0} = \bar{Z}_y^F + 3\bar{Z}_n \quad (2-12b)$$

A (2-11) és (2-12) szerint értelmezett zérus sorrendű impedanciákkal a 2-7e. ábra szerinti zérus sorrendű helyettesítő vázlat adódik.

Látható, hogy a csillagpontban lévő \bar{Z}_n^F földelő impedancia - azért, hogy I_0 hatására $3\bar{Z}_n^F \bar{I}_0$ feszültségesség keletkezzék - $3\bar{Z}_n^F$ értékkel szerepel. A zérus sorrendű hálózat a földet leképező f_0 sín felé csak a földelt csillagponton át záródik. Ha a csillagpont földetletlen, akkor a zérus sorrendű hálózatban nincs lekötés az f_0 sínhez, amint ezt a generátor esetén a szaggatott vonal érzékelteti.

A zérus sorrendű hálózat - a negatív sorrendűhöz hasonlóan - csak passzív elemeket tartalmaz, ezért ezek a szimmetrikus normál üzem esetén áram- és feszültségmentesek. Ha aszimmetrikus sönthiba (rövidzárlat), vagy soros hiba (szakadás) lép fel, akkor a sorrendi hálózatok a hibahelyi aszimmetria által meghatározott módon a hibahelyen összekapcsolódnak és ezzel a negatív és a zérus sorrendű hálózat is aktivizálódik. Például ha feltételezzük, hogy a generátor kapcsánál (2-7. ábrán a h pontban) az a fázis és a föld között földzárlat keletkezik, akkor a 2-6. ábrán megadott feltétel szerint a 2-7c, d, és e ábrák sorrendi hálózatait a h_1 - f_0 , h_0 - n_2 és h_2 - n_1 közötti kötésekkel sorba kell kapcsolni. A feszültségforrás (\bar{E}_1) és a szimmetrikus összetevőkre vonatkozó impedanciák ismeretében meghatározhatók az áramok és feszültségek szimmetrikus összetevői. Ezek (2-2) szerinti visszatranszformálásával megkapjuk magukat a fázismennyiségeket. Sok esetben nem is a fázismennyiségek, hanem maguk a szimmetrikus összetevők a kérdésesek, például az ú.n. zérus sorrendű túláramvédelem beállításához a földzárlatok során fellépő zérus sorrendű áramot kell csak ismerni.

Fontos tudni azt, hogy az egyfázisú helyettesítő hálózatokban:

- az áramok - a fázisáramokkal megegyező - vonali áramok összetevői,
- az impedanciák a fázis impedanciák,
- a feszültségességek ($\bar{Z}\bar{I}$ szorzatok) és a feszültségek a fázisfeszültségek összetevői,
- a teljesítmények az egyfázisú teljesítmények összetevői, ezért az eredő háromfázisú teljesítmény a szimmetrikus összetevőkből a következő összefüggéssel adódik:

$$\bar{S}_{3f} = 3\bar{U}_1\bar{I}_1^* + 3\bar{U}_2\bar{I}_2^* + 3\bar{U}_0\bar{I}_0^* \quad (2-13)$$

Végül megemlítjük, hogy az előzőekben az egyfázisú helyettesítő hálózatoknak csak a soros elemeivel foglalkoztunk.

A dualitás elvének felhasználásával, hasonló módon adódnak az egyfázisú hálózatok $\bar{Y}\bar{U}$ -val jellemzett söntáramait meghatározó admittanciák.

2.2.2. A hálózatelemek helyettesítése

Az alábbiakban a legfontosabb hálózatelemek egyfázisú sorrendi helyettesítő kapcsolásában szereplő elemeknek a normál üzem szempontjából fontos kvázistacioner állapotra (50 Hz-re) vonatkozó pozitív sorrendű áramköri jellemzőinek meghatározásával foglalkozunk.

2.2.2.1. Távvezeték (szabadvezeték, kábel) paraméterei

A távvezetékek túlnyomó többsége ú.n. szabadvezeték, és csak a sűrűn lakott területeken belül alkalmazzák a lényegesen drágább kábeleket. A szabadvezetékek vezetői csupasz alumínium vagy legtöbbször - a szilárdság növelése érdekében - acélmag köré sodrott ú.n. alumínium-acél sodronyok. Ezeket porcelán, üveg vagy műanyag szigetelő közbeiktatásával tartják nagyfeszültség esetén egymástól többszáz méter távolságra lévő oszlopok. A vezető felületén kialakuló térerősség csökkentésére és ezzel a sugárzás elkerülésére igen nagy feszültségű vezeték esetén fázisonként több (általában 220 kV-on 2 db, 400 kV-on 3 db, extra nagy feszültségen 4-8 db) egymástól kb. 0,4 m-re lévő vezetőkből álló ú.n. köteges vezetőt alkalmaznak. Az egyes sodronyok keresztmetszete 250-500 mm², így fázisonkénti 250-2000 mm² keresztmetszetet feltételezve a soros ellenállás 0,12-0,015 Ohm/km között van. A távvezeték pozitív sorrendű $L = 0,2 \ln D/r^*$ összefüggéssel számítható (mH/km-ben) soros induktivitása nő a D átlagos fázistávolsággal és csökken az r^* közepes geometriai (redukált) sugárral. A köteges vezető alkalmazása az induktivitást 20-30 %-kal csökkenti, mivel r^* közel egyenlő a kötegesvezetőkre írható kör sugarával, ami lényegesen nagyobb, mint a szokásos sodronyok redukált sugara.

A távvezeték söntelemét a távvezeték 8-12 nF/km körüli kapacitása képviseli, mivel a g sönt levezetés (a szigetelő szivárgási árama) gyakorlatilag elhanyagolható. A kapacitás az $\ln D/r^*$ kifejezéssel fordítva arányos, ezért a kötegesvezető alkalmazása a kapacitást növeli.

Távvezeték hosszegységre vonatkozó elosztott paramétereit a z soros impedanciát (Ohm/km) és y söntadmittanciát (S/km) a 2-8a. ábra szemlélteti. Ezekből az ú.n. (az előtanulmányokból ismert) hullámparaméterek az alábbi összefüggésekkel adódnak:

– a \bar{Z}_0 hullámimpedancia, Ohm-ban:

$$\bar{Z}_0 = \sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{y}}} = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{j\omega C}} \cong \sqrt{\frac{L}{C} \left(1 - j \frac{r}{2\omega L}\right)} \quad (2-14)$$

– a \bar{g} terjedési állandó, illetve annak összetevői, az α csillapítási tényező (1/km) és β fázistényező (rad/km):

$$\bar{g} = \alpha + j\beta = \sqrt{\bar{z}\bar{y}} \cong j\omega\sqrt{LC} \left(1 - j \frac{r}{2\omega L}\right) \quad (2-15)$$

Érdeemes megfigyelni, hogy a veszteségmentes ún. ideális távvezetésekre, amelyre a levezetés $g = 0$ -án túlmenően az $r=0$ -át is feltételezzük, a hullámimpedancia $\bar{Z}_0 = R_0 = \sqrt{L/C}$ tiszta valós, ezért hullámellenállásnak nevezik, a terjedési állandó $\bar{g} = j\mathbf{b} = j\omega\sqrt{LC}$ tiszta képzetes.

Jellegzetes feszültség szintű távvezetékek elosztott paramétereit és hullámparamétereit $f = 50$ Hz-re a 2-2. táblázat szemlélteti.

Feszültség U_n kV	Vezeték		Elosztott paraméterek			Hullámparaméterek			
	A mm^2	D m	r Ω/km	$x=\omega L$ Ω/km	ωC $\mu\text{S}/\text{km}$	Z_0 Ω	$\angle Z$ fok	α 10^{-3} 1/km	β 10^{-3} rad/km
20	95	1.70	0.36	0.387	3.00	396	-24.9	0.501	1.077
120	250	5.75	0.117	0.404	2.81	379	-8.24	0.154	1.065
400	3x500	15.80	0.0195	0.3036	3.71	286	-1.84	0.0341	1.061

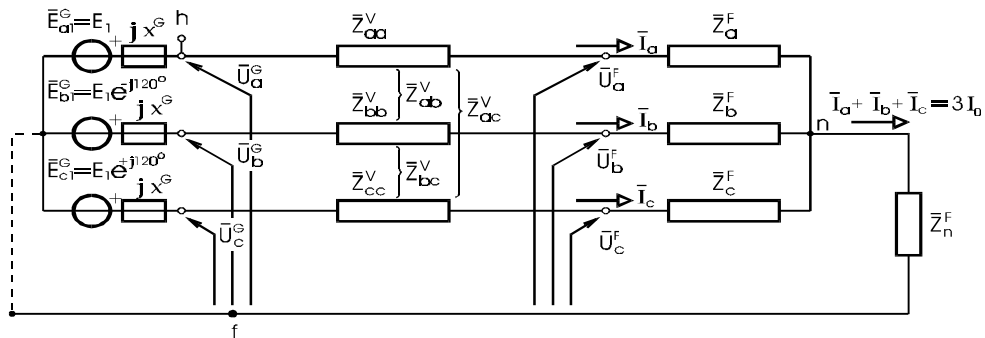
2-2.táblázat: Szabadvezetékek elosztott- és hullámparamétereit

Látható, hogy a hullámimpedancia abszolút értéke a 20 és 120 kV-os vezeték esetén közel azonos, a 400 kV-os vezetéké mintegy 25-30 %-kal kisebb a köteges vezetők miatt. A távvezeték teljesítményátvivő képességének fontos jellemzője az U_n^2 / R_0 természetes teljesítmény (4.1.2.pont), amelyet a köteges vezető alkalmazása számottevően, kb. 1/3-al növel. A nagyobb feszültség szintek felé haladva a távvezetékek Z_0 hullámimpedanciája egyre jobban megközelíti az ideális vezeték jellemző R_0 hullámellenállást, az α csillapítás pedig közel nulla lesz.

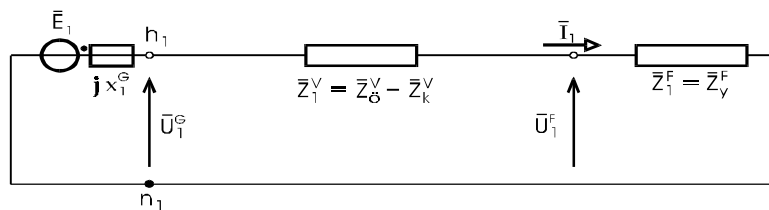
A távvezeték, mint az S (Sending) és az R (Receiving) végei közötti négy pólus - adott frekvenciájú állandósult átvitel szempontjából - pontosan leírható az ismert, hiperbolikus függvényekkel megadható A, B, C, D ($D = A$) négy pólus lánccparaméterekkel. Gyakorlati célokra a távvezeték az egyenértékű Π kapcsolással helyettesíthető, amelyet - a koncentrált elemű paraméterek számítási összefüggéseivel együtt - a 2-8. ábra ad meg. A Π vázlat jól érzékelteti azt, hogy egy távvezeték az általa összekötött két alállomás között a \bar{Z}_{Π} -nek megfelelő, ohmos és induktív jellegű impedancián át létesít kapcsolatot, valamint az alállomásokban az $\bar{Y}_{\Pi}\bar{U}$ áramú "terhelést" jelent, ami \bar{Y}_{Π} kapacitív jellege révén lényegében kapacitív meddő forrás. Veszteségmentes ideális vezeték esetén $\bar{Z}_{\Pi} = jX_{\Pi}$ induktív reaktancia, $\bar{Y}_{\Pi} = jB_{\Pi}$ kapacitív szuszceptancia.



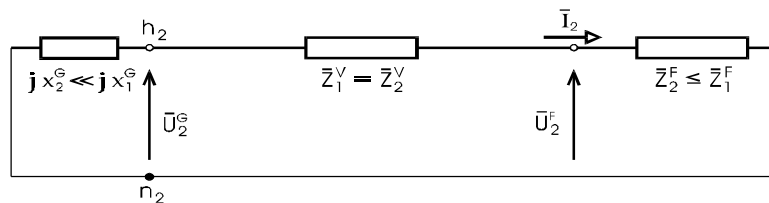
a, Egyvonalas kapcsolási vázlat.



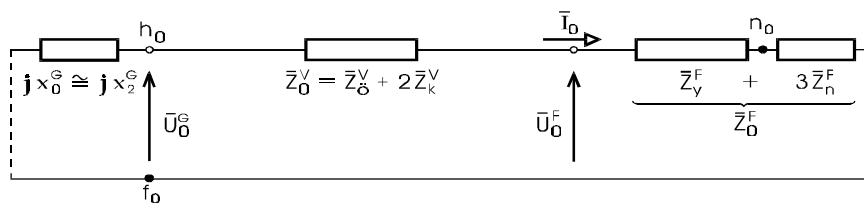
b, Háromfázisú hálózat.



c, Pozitív sorrendű hálózat.



d, Negatív sorrendű hálózat.



e, Zérus sorrendű hálózat.

2-8.ábra Távvezeték egyfázisú koncentrált paraméterű helyettesítése

A villamosan rövid szabadvezeték esetén \bar{Z}_{Π} gyakorlatilag a vezeték teljes $\bar{z}l$ soros impedanciájával egyenlő, míg az \bar{Y}_{Π} , amely a vezeték fél hosszához tartozó $\bar{y}l/2$ admittancia, elhanyagolhatóvá válik és így a 2-8d. ábra szerinti kapcsolás alkalmazható. A mennyiségi viszonyokat a 2-2. táblázatban szereplő vezetékre a 2-3. táblázat szemlélteti, a vizsgált feszültségek esetén "szokásos" és viszonylag nagy vezeték hosszakra. Az adatokból

megállapítható, hogy közép feszültségű vezetékeknel a rövid vezetékre vonatkozó soros impedanciával történő helyettesítés mindig megfelelő (2-8d. ábra), míg a nagyfeszültségű vezetékeknel kb. 150 km felett indokolt a lánccparaméterek alapján adódó koncentrált elemű paraméterek alkalmazása (2-8b. vagy c. ábra).

U _n	l	γl		Soros impedancia			Sönt admittancia		
		αl	βl	$\frac{\text{sh}\gamma l}{\gamma l}$	z _l	Z _π	$\frac{\text{th}\gamma l/2}{\gamma l/2}$	$\frac{\omega C l}{2}$	Y _π
kV	km	10 ⁻³	10 ⁻³ rad	absz fok	Ohm fok	Ohm fok	absz fok	μS fok	μS fok
20	30	15.03	32.31	0.999	15.86	15.86	1.0	45	45
				0.009	47.1	47.1	0.0	90	90
120	100	15.4	106.5	0.998	42.06	41.98	1.001	281	281
				0.031	73.9	73.9	0.0	90	90
400	500	17.05	530.5	0.954	152.1	145.1	1.025	1855	1900
				0.176	86.5	86.5	0.0	90	90

2-3.táblázat: Szabadvezetékek II modelljének jellemzői

Kábelek esetén a fázistávolság és ezzel az $\ln(D/r)$ viszony is lényegesen kisebb, mint szabadvezetékeknel, ami a fajlagos soros reaktancia csökkenését és a kapacitás növekedését eredményezi. A kapacitást tovább növeli a szigetelőanyag relatív permeabilitása (polietilénre 2,3, telített papírra 3,5). A 25-500 mm² között változó vezető-keresztmetszetek esetén a kábelek pozitív sorrendű fajlagos soros reaktanciája kb. 1/3-a (0,16-0,1 Ohm/km), a kapacitás pedig közel 100-szorosa (0,2-0,75 μF/km) a szabadvezetékekének.

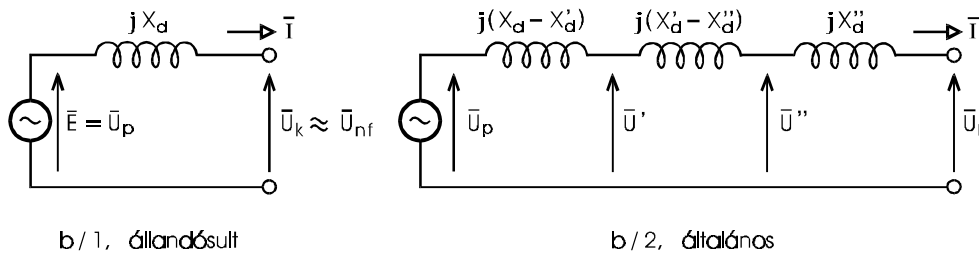
2.2.2.2. Hálózati tápforrások paraméterei

a) Generátor

A villamosenergia-hálózatok tényleges tápforrásai a 9. fejezetben tárgyalt szinkron generátorok. A generátor egyfázisú helyettesítő áramköreinek paraméterei a kapocstábla (névleges) adatok alapján adhatók meg (2-9. ábra).



a, kapocstábla (névleges) adatok



b, helyettesítő kapcsolás jellemzői

2-9. ábra Generátor pozitív sorrendű helyettesítése

Az erőművi generátorok állandósult üzemre vonatkozó belső impedanciáját az X_d szinkron reaktancia képezi, amelyet az ϵ_d százalékos értékkel adnak meg. Az ϵ_d százalékos feszültségesés a generátor I_n névleges áramhoz tartozó feszültségesés alábbi összefüggés szerinti értéke

$$e_d = 100 \frac{X_d I_n}{U_n / \sqrt{3}}$$

Ebből a helyettesítő vázlatban szereplő X_d szinkron reaktancia értéke Ohmban:

$$X_d = \frac{e_d}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} \frac{U_n}{U_n} = \frac{e_d}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (2-16)$$

Ezzel a generátor állandósult üzemre vonatkozó pozitív sorrendű helyettesítése a 2-9.b/1. ábra szerinti. U_p pólusfeszültséget a generátor gerjesztésével úgy állítják be, hogy a generátor névleges körüli kapocsfeszültség mellett a megkívánt meddő teljesítményt adja le. Ha a terhelés üresjáráshoz közeli, akkor U_p kb. a névleges feszültség, névleges körüli terhelésnél, mivel $e_d = 150-200\%$ körüli, U_p a névleges feszültség 1,5-2-szerese. Hirtelen bekövetkező változások, így rövidzárlatok esetén a rotoron lévő rövidrezárt csillapító és gerjesztő tekercsek megakadályozzák a rotor fluxus hirtelen változását, ezért a szinkron gép úgy viselkedik, hogy

- az 1-2 periódusig tartó szubtranzlens állapotban a reaktanciája az X_d'' szubtranzlens reaktancia, e_{me} -je az U'' szubtranzlens reaktancia mögötti feszültség,
- a mp nagyságú tranzlens állapotban a reaktanciája X_d' tranzlens reaktancia, e_{me} -je az U' tranzlens reaktancia mögötti feszültség.

Hengeres pólusú szinkron gép átmeneti állapotokra is alkalmazható helyettesítő kapcsolását a 2-9.b/2. ábra szemlélteti. U'' és U' - az U_p pólusfeszültséghez hasonlóan - a tranziens megelőző állandósult állapot árama és kapcsolófeszültsége alapján számítható. A tranziens állapotra vonatkozó százalékos feszültségesések: $e'_d = 15-30\%$, $e''_d = 8-20\%$, tehát lényegesen kisebb, mint a szinkron reaktanciához tartozó értékek. A szinkron generátorok negatív sorrendű reaktanciája a szubtranziens reaktanciával közel megegyező (2-3 %-kal nagyobb).

b) Hálózati táppont

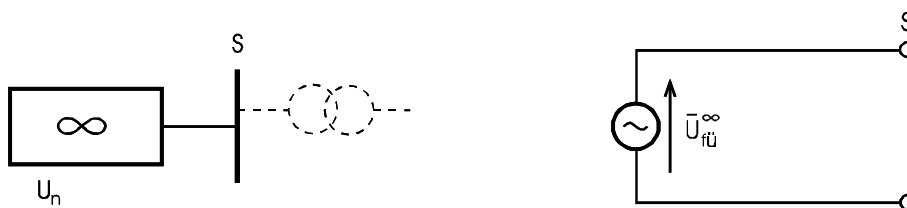
Egy adott hálózati táppont - például nagy/középfeszültségű alállomás nagyfeszültségű gyűjtősíne - szempontjából az azt tápláló teljes "mögöttes hálózat" a Thevenin elv szerint egyetlen feszültségforrással helyettesíthető.

A mögöttes hálózatot az U_n névleges feszültsége és az S_z háromfázisú rövidzárlati teljesítménye jellemzi (2-10a.ábra). A rövidzárlati teljesítményt úgy értelmezhetjük, hogy $S_z = \sqrt{3} U_n I_z$. Az I_z rövidzárlati áramhoz 100 % feszültségesés tartozik, azaz értelemszerűen $e_z = 100\%$. Ezt figyelembevéve (2-16)-ból, a hálózati táppont Z^H mögöttes impedanciája ohmban:

$$Z^H = \frac{U_n^2}{S_z} \quad (2-17)$$



a, rövidzárlati teljesítménnyel jellemzett hálózat



b, végtelen hálózat

2-10. ábra Hálózati táppont helyettesítése

Ha a mögöttes hálózat R^H/X^H viszonya adott, akkor Z^H ennek megfelelően felosztható, egyébként a mögöttes hálózatot Z^H -val megegyező reaktanciával helyettesítjük (2-10a. ábra).

Például, ha egy alállomás névleges feszültsége $U_n = 120$ kV, rövidzárlati teljesítménye $S_Z = 1200$ MVA, és $R/X = 0,2$, akkor

$$Z^H = \frac{120^2}{1200} = 12 \text{ ohm}$$

és

$$Z^H = \sqrt{(R^H)^2 + (X^H)^2} = X^H \sqrt{\left(\frac{R^H}{X^H}\right)^2 + 1} = X^H \sqrt{0,2^2 + 1} = 1,02 X^H$$

azaz

$$X^H = \frac{Z^H}{1,02} = 11,76 \text{ ohm} \quad \text{és} \quad R^H = 0,2 X^H = 2,35 \text{ ohm}$$

A hálózatot helyettesítő feszültségforrás feszültsége megegyezik a hálózat mértékadó U_{fi}^H üzemi fázisfeszültségével.

Egyes esetekben a mögöttes hálózatot ú.n. végtelen hálózatnak tekinthetjük, és az U_{fi}^∞ üzemi fázisfeszültségnek megfelelő ideális feszültségforrással helyettesítjük (2-10b. ábra). Nyilvánvaló, hogy a végtelen hálózatnak egy olyan csatlakozó elemen át nézve van létjogosultsága, amelynek az impedanciája sokkal nagyobb, mint a végtelennek feltételezett hálózat mögöttes impedanciája (lásd 2.2.2.3. pontban adott példát).

A hálózat egy adott pontjára - általában gyűjtősínre - vonatkozó mögöttes hálózat helyettesítése érdekében, tehát az adott pontra vonatkozóan ismerni kell S_Z -t és U_{fi}^H -t. Egy energiarendszer alaphálózata esetén ez egy sok - esetenként több száz - csomópontú többszörösen hurkolt, több feszültségintű hálózatra vonatkozó vizsgálat alapján történhet. A vizsgálat a nagyteljesítményű digitális számítógépek rendelkezésre állása előtt a hurkolt hálózatot megfelelő léptékben leképező ú.n. hálózati kismintán történő mérést jelentett.

Napjainkban a hálózattervezési vizsgálatok megfelelő hálózatszámítási módszer és szoftver alkalmazásával, számítógéppel történnek. Ennek részletes ismertetése az anyag kereteit meghaladja, ezért megjegyezzük, hogy a hálózati analízis logikailag két fő lépésből áll:

- teljesítményáramlás és gyűjtősín-feszültségek számítása
- rövidzárlati áramok számítása

A villamosenergia-rendszerekben a fogyasztói teljesítmény időszakosan változik (lásd 4.2. pontot). Ehhez igazodva változik a hálózatra dolgozó turbina-generátor egységek száma, valamint a párhuzamos energiautakat képező hálózatelemek, például párhuzamosan kapcsolt transzformátorok száma, azaz a hálózatkép. Ennek figyelembevételére két hálózati állapotot szokás definiálni, nevezetesen a nagy terhelési állapotra vonatkozó ú.n. maximális és a kis terhelési állapotra vonatkozó ú.n. minimális hálózati állapotot. Az egyes hálózati gyűjtősínhez hozzárendelhető egy maximális (S_{zmax}) és egy minimális (S_{zmin}) zárlati teljesítmény. Az S_{zmin} gyűjtősínenként más és más hálózati kapcsolási állapot eredményeként adódik. (Például valamely gyűjtősínhez kapcsolódó vezetékek közül az egyik, vagy szélső esetben akár két vezeték is kikapcsolva.) A hálózat egy adott helyén a nagyobb rövidzárlati teljesítmény, illetve kisebb mögöttes impedancia merevebb csatlakozási pontot jelent.

2.2.2.3. Transzformátor paraméterei

Az energiaátviteli transzformátorokkal részletesen a 6. fejezet foglalkozik. A kéttekercselésű energiaátviteli transzformátornak az adattábla adataiból (2-11a. ábra) meghatározhatjuk a 2-11b. ábra szerinti egyszerűsített helyettesítő kapcsolás paramétereit. Az egyszerűsített kapcsolat a mágnesező ágat elhanyagolja és a transzformátort a két tekercs együttes szórási impedanciájával, valamint komplex áttételt figyelembevevő ideális transzformátorral képezi le.

A szórási impedancia ohmban a (2-16) összefüggés alapján számítható, a transzformátor nagyobb feszültségű (N) vagy kisebb feszültségű (K) oldalára (2-11b./1 és 2-11b./2 ábra) annak megfelelően, hogy a transzformátor melyik oldali feszültségét vesszük figyelembe, azaz

$$Z^N = \frac{e}{100} \frac{(U_n^N)^2}{S_n} \quad \text{ill.} \quad Z^K = \frac{e}{100} \frac{(U_n^K)^2}{S_n} \quad (2-18)$$

Ha a transzformátor ohmos ellenállására vonatkozó ϵ_r is adott, akkor ezt helyettesítve ϵ helyébe a (2-18) kifejezésben a szórási impedancia ellenállás komponensét kapjuk.

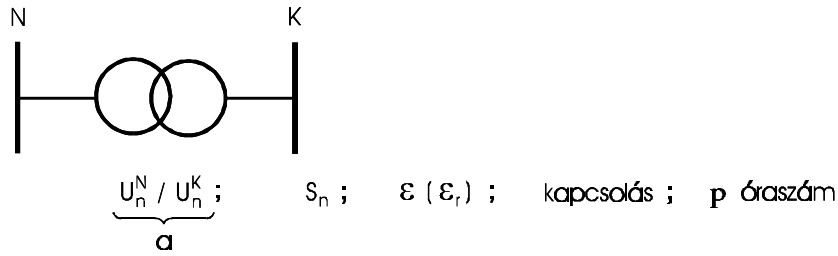
Megjegyezzük, hogy a viszonylagos egységeket használva (lásd 2.2.3. pontot) a szórási impedancia függetlenné válik a feszültségszinttől (2-11c. ábra), csak a transzformátor kapcsolási csoport szerinti szögforgatását kell figyelembevenni.

Az energiaátviteli transzformátorok ϵ százalékos feszültségesése a nagy/nagy feszültségű (pl. 400/120 kV-os) és nagy/középfeszültségű (pl. 120/22 kV-os) transzformátorok esetén 8-12% és a szórási impedancia gyakorlatilag tiszta reaktanciának vehető, közép/kisfeszültségű (pl. 21/0,4 kV -os NA típusú) transzformátoroknál $\epsilon = 4,5-5,6 \%$, $\epsilon_r = 2,76-1,11 \%$, ahol az első értékek kisebb teljesítményűekre ($S_n=40$ kVA), a második értékek nagyobb teljesítményűekre ($S_n = 1600$ kVA) vonatkoznak.

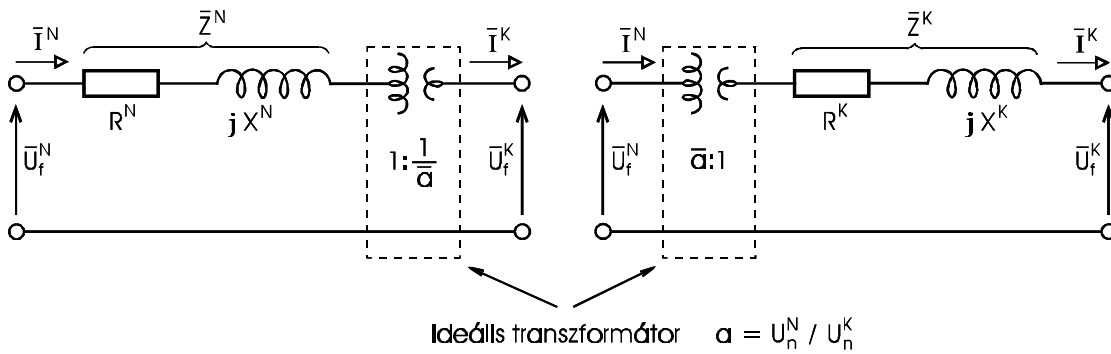
Például egy NA 250 típusú $U_n^K / U_n^k = 21/0,4$ kV-os, $S_n = 250$ kVA teljesítményű, $\epsilon = 4,5 \%$ -os feszültségesésű ($\epsilon_r = 1,8 \%$) transzformátor (2-18) összefüggés szerinti szórási impedanciája

	21 kV-on	0.4 kV-on	Viszonylagos
	Ohm	Ohm	egységben
Z	79.38	0.0288	0.045

A relatív feszültségesés $e_x = \sqrt{4.5^2 - 1.8^2} = 4.12\%$, az $R/X = \epsilon_r/\epsilon_x = 0,44$.



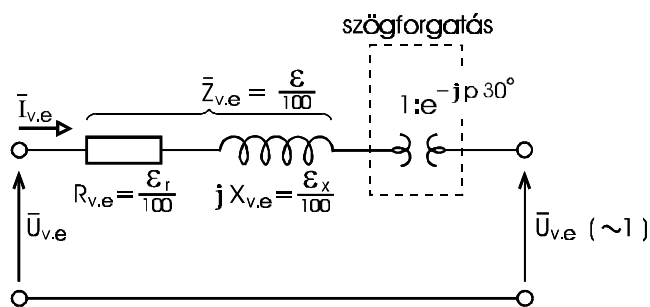
a, adattábla adatok



b / 1, nagyobb feszültségű szintre

b / 2, kisebb feszültségű szintre

b, dimenzionális értékek



c, viszonylagos egységben megadott értékek (teljesítmény alap a transzformátor névleges teljesítménye.)

2-11. ábra Transzformátor paraméterei

Az alaphálózatról induló - általában sugaras - fogyasztói hálózatok mentén a rövidzárlati teljesítmény a fogyasztó felé haladva csökken. Jellegzetes lépcsős csökkenést okoznak a

transzformátorok. Egy transzformátor után a rövidzárlati teljesítmény kisebb, illetve végtelen hálózatról történő táplálás esetén egyenlő az ú.n. saját rövidzárlati teljesítménnyel, amely

$$S_z = \frac{S_n}{\epsilon/100}$$

Például a hazai gyakorlatban használt legnagyobb teljesítményű $S_n = 40$ MVA-es, 120/22 kV-os, kerekén $\epsilon = 10\%$ -os feszültségesésű transzformátor saját rövidzárlati teljesítménye: $S_z = 40/0,1 = 400$ MVA.

Ha ez a transzformátor egy $S_{z120} = 1200$ MVA rövidzárlati teljesítményű 120 kV-os gyűjtősínhez csatlakozik, akkor a 22 kV-os oldalon a rövidzárlati teljesítmény az alábbiak szerinti lesz. Számoljunk viszonylagos egységben, a transzformátor névleges jellemzőit használva alapoknak, azaz $S_a = 40$ MVA, a feszültség alapok $U_a = 120$ kV, illetve 22 kV. A tiszta reaktanciának tekintett impedanciák értéke a (2-26)-ból, az $U_a = U_n$ figyelembevételével:

transzformátorra: $X^T = 0,1$

hálózatra: ($\epsilon = 100\%$, $S_n^H = S_{z120}$)

$$X^H = S_a/S_z = 40/1200 = 0,033$$

A 22 kV-os oldali rövidzárlat árama:

$$I = \frac{1}{j(X^T + X^H)} = \frac{1}{j(0,1 + 0,033)} = -j7,52 \text{ v.e.}$$

A 22 kV-os oldali rövidzárlati teljesítmény:

$$S_{z,22} = 7,52 S_n = 7,52 \cdot 40 = 300,75 \text{ MVA}$$

tehát kerekén a saját rövidzárlati teljesítmény 75 %-a.

2.2.2.4. Fogyasztó paraméterei

A fogyasztó névleges adataiból (2-12a. ábra) meghatározható

– az (1-28a) alapján az I_n^F névleges árama

$$I_n^F = \frac{S_n^F}{\sqrt{3}U_n^F} \quad (2-19)$$

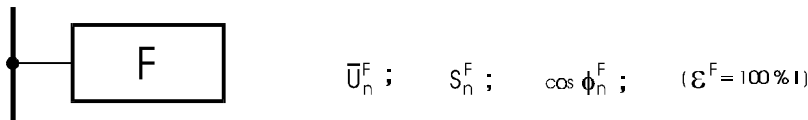
a (2-16) alapján, figyelembevételével, hogy a fogyasztón a névleges áram hatására a feszültségesés $\epsilon = 100\%$:

$$Z_n^F = \frac{U_n^{F2}}{S_n^F} \quad (2-20)$$

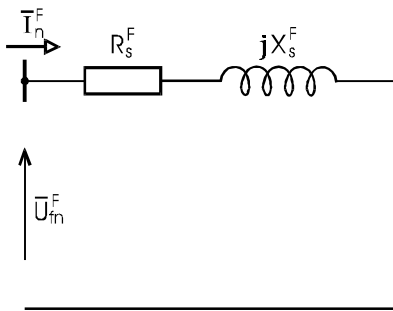
A fogyasztót sorosan kapcsolt R_S^F és X_S^F elemekkel képezve le (2-12b. ábra) ezek értéke:

$$R_S^F = Z_n^F \cos \mathbf{j}_n^F; \quad X_S^F = Z_n^F \sin \mathbf{j}_n^F \quad (2-21)$$

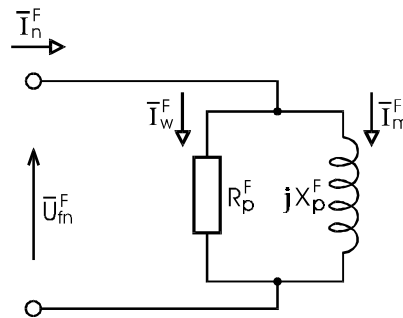
ahol \mathbf{j}_n^F a fogyasztó teljesítménytényezőjének szöge (induktív fogyasztó esetén pozitív).



a, adattábla adatok



b, soros helyettesítés



c, párhuzamos helyettesítés

2-12. Ábra Fogyasztó paraméterei

A fogyasztót párhuzamosan kapcsolt R_p^F és X_p^F elemekkel képezve le, azok az alábbiak szerinti névleges hatásos és meddő teljesítményből

$$P_n^F = S_n^F \cos \phi_n^F \quad \text{és} \quad Q_n^F = S_n^F \sin \phi_n^F \quad (2-22)$$

a (2.20) összefüggés alapján adódnak:

$$R_p^F = \frac{(U_n^F)^2}{P_n^F}; \quad X_p^F = \frac{(U_n^F)^2}{Q_n^F} \quad (2-23)$$

A fentiek szerinti modell feltételezi, hogy a fogyasztó impedanciátartó. A tényleges fogyasztók viselkedése ennél bonyolultabb, mivel a fogyasztó lehet áramtartó, teljesítménytartó és ezek kombinációja. A fogyasztók hatásos és meddő teljesítményének feszültség és frekvencia függésével a 4.4.2. pont foglalkozik.

2.2.3. Viszonylagos egységek alkalmazása

A villamos gépeknél bevezetett százalékos feszültségesés (drop) bevezetése azért történt, mert a műszaki gyakorlat számára sokkal kifejezőbb az, hogy a névleges terhelés esetén a feszültségesés a névleges feszültség 4,5 %-a, mint ha például azt mondanánk, hogy 553 V. Ugyanis a V-ban kifejezett értéknél meg kellene mondani azt, hogy melyik feszültségszintre vonatkozik, fázis vagy vonali értékről van-e szó. Az Ohm, A, kV, MVA, vagy MW helyett a viszonylagos egységek (v.e.) használatának az alábbi fő előnyei vannak:

- a v.e.-ben sokkal kifejezőbbek és összehasonlíthatóbbak az értékek,

- a v.e.-ben megegyezik a fázis és a vonali feszültség, valamint az egy- és a háromfázisú teljesítmény (az eltérés az alapokban van figyelembe véve),
- a v.e.-ben megadott értékek a transzformátor két oldalán, vagy bármely más - harmonizáltan megválasztott alaprendszer szerinti - feszültség szinten megegyeznek.

A v.e. lényegében a névleges értékekre mint alaprendszerre vonatkoztatott rendszer általánosítása.

A villamosenergia-rendszer vizsgálatokor alkalmazott alapmennyiségek: az S_a három- és az S_{fa} egyfázisú teljesítmény alap ($S_a = 3S_{fa}$), az U_a vonali és az U_{fa} fázisfeszültség alap ($U_a = \sqrt{3} U_{fa}$), az I_a áram alap és a Z_a impedancia alap. Ezekből kettő szabadon megválasztható, a másik kettő - az Ohm-törvény és a teljesítmény kifejezés alapján - kiadódik. Általában a feszültség alapot valamely névleges feszültséggel megegyezően, valamint a teljesítményalapot a vizsgálni kívánt teljesítményszintnek megfelelően megválasztjuk és ezekből a másik két alapot az alábbiak szerint számítjuk:

$$I_a = \frac{S_a}{\sqrt{3}U_a} [A] \quad \text{és} \quad Z_a = \frac{U_a^2}{S_a} [ohm] \quad (2-24)$$

Az alapok ismeretében a viszonylagos egységek a dimenzionális értéknek az alappal való osztásával és viszont adódnak. Tehát pl. az ohm-ban adott Z impedancia viszonylagos egységben:

$$Z_{v.e.} = \frac{Z^{ohm}}{Z_a} = Z^{ohm} \frac{S_a}{U_a^2} \quad (2-25)$$

A százalékban megadott érték viszonylagos egységre (2-16) és (2-25) alapján a következők szerint számítható át

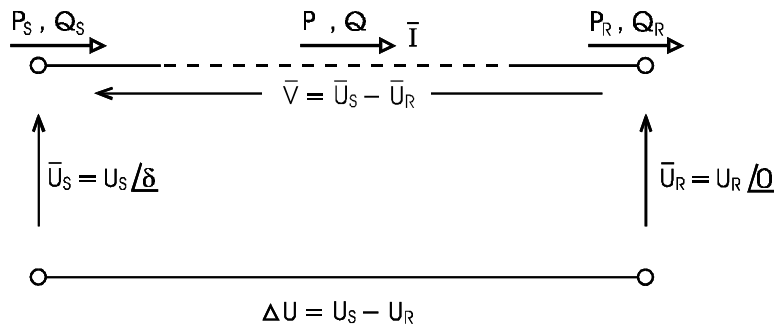
$$Z_{v.e.} = \frac{e}{100} \frac{U_n^2 S_a}{U_a^2 S_n} \quad (2-26)$$

Látható, hogy amennyiben az alapmennyiségek megegyeznek a névleges értékkel, akkor $e/100$ egyben a v.e.-beli érték.

A transzformátorok a hálózatot különböző feszültség-körzetekre osztják. A teljesítményalap az összes körzetben azonos. A feszültség alapot az egyik körzetben - az előzőek szerint - megválaszthatjuk, a szomszédos körzetre pedig a határoló transzformátor névleges feszültségei arányában (a feszültség alapot a transzformátornak az adott körzet felőli névleges feszültségével osztva és a szomszédos körzet felőli névleges feszültséggel szorozva) kell átszámítani. A szomszédos körzetben Z_a és I_a a (2-24) szerint számítandó. Természetesen a dimenzionális mennyiségek és a v.e.-ek közötti átszámítás minden körzetben az ott érvényes alapmennyiségekkel történik.

2.3. Hálózatág feszültségesés és teljesítmény viszonyai

A hálózat S és R pontjai közötti távvezeték feszültség és teljesítmény jellemzőit - általános esetre - a 2-13. ábra szemlélteti.



2-13. ábra Távvezeték feszültség és teljesítmény jellemzői

Sugaras távvezeték esetében általában az a kérdés vetődik fel, hogy adott teljesítmény, illetve áram esetén mekkora a feszültségesés, illetve mekkora az átvihető teljesítmény határa.

Hurkolt hálózat vezetékága esetén a fő kérdés a távvezetéken áramló teljesítmény és a végponti feszültségek közötti kapcsolat.

Az átvihető teljesítményre a következő három feltételből adódhat korlát: a melegedés, feszültségesés és stabilitás.

A melegedés miatt I áramhatár általában a kisfeszültségű hálózatokra és a rövid kábelekre jellemző. A ΔU feszültségesés, mint teljesítmény-átviteli korlát, a kis- és főleg a közepfeszültségű sugaras vezetékéknél lép fel. A stabilitás miatti teljesítménykorláttal az alaphálózati távvezetékek esetén kell számolni.

2.3.1. Feszültségesés alapösszefüggés

Az előzőekben tárgyaltak szerint a távvezeték, de ugyanígy a generátor és a transzformátor helyettesítő áramkörében soros R és X szerepel (2-14a.ábra). Egy $I \angle \varphi$ terhelőáram hatására létrejövő komplex \bar{V} feszültségesés (2-14b. ábra):

$$\bar{V} = \bar{U}_S - \bar{U}_R = \bar{Z}\bar{I} = (R + jX)(I_w + jI_m) = (RI_w - XI_m) + j(RI_m + XI_w) \quad (2-27)$$

A feszültségesés komponensei:

- a hosszirányú feszültségesés

$$V_h = RI_w - XI_m \quad (2-28)$$

- a keresztirányú feszültségesés pedig

$$V_k = RI_m + XI_w \quad (2-29)$$

A hosszirányú feszültségesés a feszültségek közötti $\delta = \angle U_S - \angle U_R$ terhelési szöggel kifejezve:

$$V_h = U_S \cos \delta - U_R \quad (2-30)$$

A gyakorlatban előforduló kis terhelési szögeknél jó közelítéssel

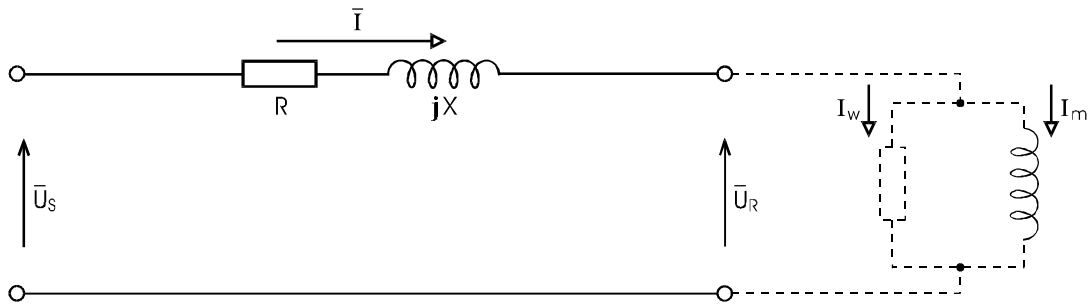
$$V_h = U_S - U_R = \Delta U$$

azaz a hosszirányú feszültségcsökkenés közel egyenlő a feszültség nagyságában bekövetkező, a fogyasztó által érzékelt feszültségcsökkenéssel.

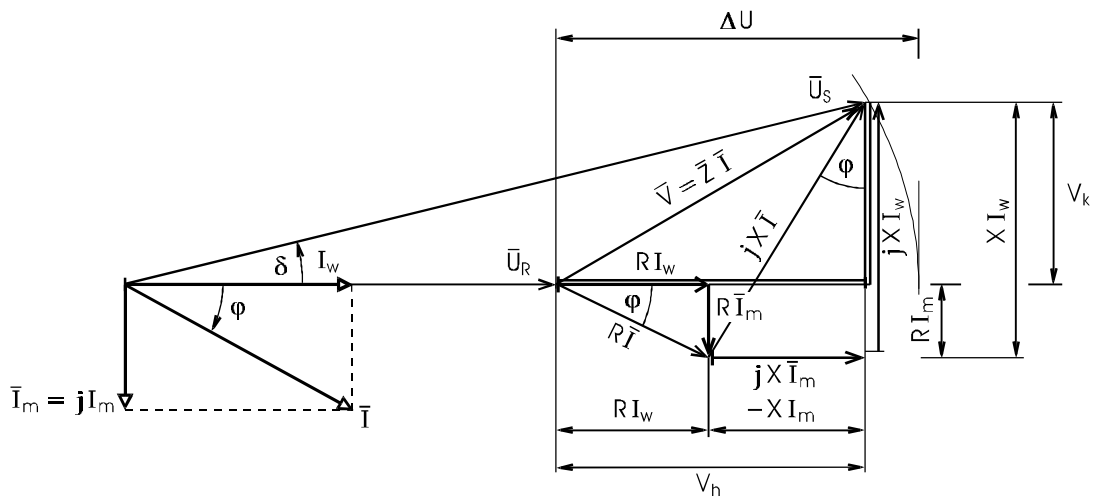
A keresztirányú feszültségcsökkenés a δ terhelési szöggel:

$$V_k = U_S \sin \delta \quad (2-31)$$

azaz a keresztirányú feszültségcsökkenés $\sin \delta$ -val, kis szögek esetén pedig magával δ -val arányos.



a, áramköri jellemzők



b, fázor ábra (induktív terhelésre, ϕ és I_m negatív)

2-14. ábra Soros R és X elemeken fellépő V_h és V_k

Kis R/X viszonynál, ami mind a nagyfeszültségű távvezetésekre, mind pedig a nagyteljesítményű generátorra és transzformátorra jellemző (2-28) és (2-29) az alábbiak szerint egyszerűsödik:

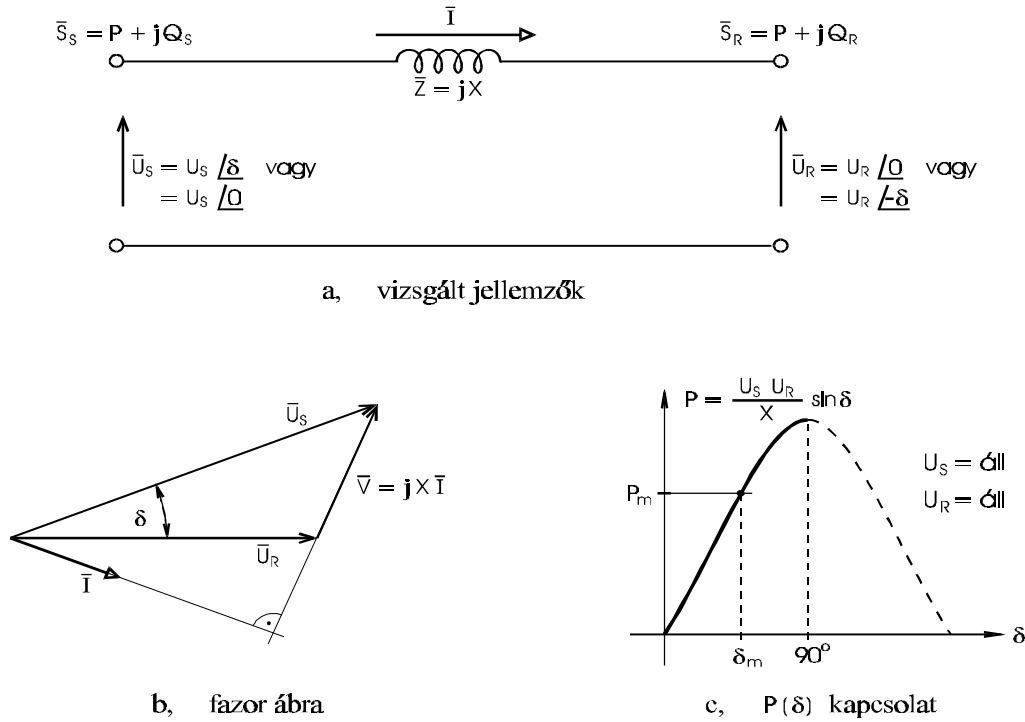
$$V_h = -X I_m \quad \text{és} \quad V_k = X I_w \quad (2-32)$$

azaz a feszültség nagyságát befolyásoló hosszanti feszültségcsökkenést a meddő áram, illetve meddő teljesítmény szállítás okozza a reaktancián, míg a terhelési szöget a wattos áram, illetve hatásvos teljesítmény szállítás okozza szintén a reaktancián.

Fontos megjegyezni, hogy mivel a tipikus induktív jellegű meddő teljesítmény esetén I_m negatív, ezért a hosszanti feszültségesésben szereplő $-X I_m$ tag pozitív.

2.3.2. Teljesítményátvitel alapösszefüggése

A veszteségmentes - soros X reaktanciával jellemzett - teljesítményátvitel esetére a 2-15. ábrán feltüntetett végponti feszültségekkel a teljesítmény az alábbiak szerint adható meg:



2-15. ábra Veszteségmentes teljesítményátvitel jellemzői

A végponti feszültségekkel az I áram az alábbiak szerint fejezhető ki:

$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_S - \bar{U}_R}{Z} = \frac{\bar{U}_S - \bar{U}_R}{jX}$$

Az áram konjugáltja (2-15b. ábra), ha :

– a referencia az S oldali feszültség ($U_S = U_S$ és $U_R = U_R e^{-j\delta}$):

$$\bar{I}^* = \left(\frac{U_S - U_R e^{-j\delta}}{jX} \right)^* = \frac{U_S - U_R e^{j\delta}}{-jX} = \frac{U_R \sin \mathbf{d}}{X} + j \frac{U_S - U_R \cos \mathbf{d}}{X} \quad (2-33a)$$

– a referencia az R oldali feszültség ($U_S = U_S e^{j\delta}$ és $U_R = U_R$):

$$\bar{I}^* = \left(\frac{U_S e^{j\delta} - U_R}{jX} \right)^* = \frac{U_S e^{-j\delta} - U_R}{-jX} = \frac{U_S \sin \mathbf{d}}{X} + j \frac{U_S \cos \mathbf{d} - U_R}{X} \quad (2-33b)$$

A teljesítmény az S végen az S végponti feszültséget választva referenciának és ezért az \bar{I}^* -ot (2-33a.)-ből helyettesítve:

$$\bar{S}_S = \bar{U}_S \bar{I}^* = \frac{U_S U_R}{X} \sin \mathbf{d} + j \frac{U_S (U_S - U_R \cos \mathbf{d})}{X}$$

azaz a hatásos teljesítmény:

$$P = \frac{U_S U_R}{X} \sin \mathbf{d} \quad (2-34)$$

az S oldali meddő teljesítmény:

$$Q_S = \frac{U_S (U_S - U_R \cos \mathbf{d})}{X} \quad (2-35a)$$

A teljesítmény az R végen, az R végponti feszültséget választva referenciának és ezért a (2-33b) szerinti \bar{I}^* -at használva:

$$\bar{S}_R = \bar{U}_R \bar{I}^* = \frac{U_S U_R}{X} \sin \mathbf{d} + j \frac{U_R (U_S \cos \mathbf{d} - U_R)}{X}$$

azaz a hatásos teljesítmény - a veszteségmentes esetnek megfelelően az R végen is a (2-34) összefüggés szerinti, az R oldali meddő teljesítmény pedig:

$$Q_R = \frac{U_R (U_S \cos \mathbf{d} - U_R)}{X} \quad (2-35b)$$

Egyszerűen belátható, hogy a meddő teljesítmények különbsége

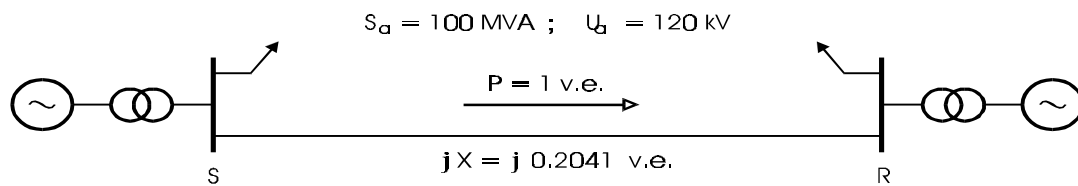
$$Q_S - Q_R = \frac{(\bar{U}_S - \bar{U}_R)^2}{X} = \frac{V^2}{X} = XI^2$$

ami az X reaktancia meddő teljesítmény nyelése.

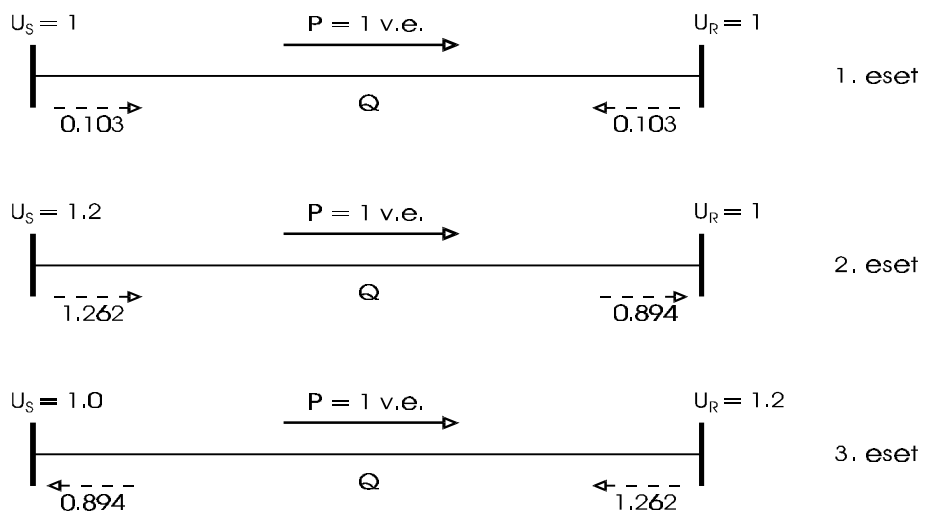
A P hatásos teljesítményre vonatkozó (2-34) összefüggésből világosan látszik, hogy az átvitt teljesítménnyel a δ terhelési szög nő, $\delta = 90^\circ$ -nál maximuma van és stabilis munkapont $\delta < 90^\circ$ tartományban van (2-15c. ábra). A statikus szinkron stabilitás kérdésével a 4.4.2. pont foglalkozik.

A (2-35) kifejezések számlálójában lévő zárójeles kifejezések azt mutatják, hogy a meddő teljesítmény nagyságát és irányát alapjában véve a végponti feszültségek közötti különbség szabja meg ($\delta = 0$, azaz ha $P = 0$, akkor mindkét végre vonatkozó kifejezésben $U_S - U_R$ szerepel). Lényegében a nagyobb feszültségű végtől a kisebb feszültségű felé áramlik az induktív jellegű meddő teljesítmény.

Példaként vizsgáljuk meg, viszonylagos egységeket használva, a 2-16a. ábra szerinti távvezeték meddőteliesség viszonyait állandó $P=1$ v.e. hatásos teljesítmény-átvitel mellett, a 2-16b. ábrán feltüntetett sínfeszültség változatokra.



a, vizsgált átvitel jellemzői



b, végponti feszültség változatok

2-16. ábra Távvezeték végponti feszültségei és a meddő teljesítmény közötti kapcsolat

Az 1.esetben:

– a (2-34) alapján a hatásos teljesítmény kifejezése:

$$1 = \frac{1 \cdot 1}{0.2041} \sin d \rightarrow d = 11.78^\circ$$

– a (2-35) a és b alapján a meddő teljesítmények:

$$Q_S = \frac{1(1 - \cos 11.78^\circ)}{0.2041} = 0.103 \text{ v.e.} \quad (10.3 \text{ MVar})$$

$$Q_R = \frac{1(\cos 11.78^\circ - 1)}{0.2041} = -0.103 \text{ v.e.} \quad (-10.3 \text{ MVar})$$

ami azt jelenti, hogy a távvezeték meddő teljesítmény nyelését (0,206 v.e., 20,3 MVar) a két végponti állomás fele-fele arányban szolgáltatja.

A 2.esetben:

– a hatásos teljesítmény összefüggésből:

$$1 = \frac{1,2 \cdot 1,0}{0,2041} \sin \mathbf{d} \rightarrow \mathbf{d} = 9,79^\circ$$

– a meddő teljesítmények:

$$Q_S = \frac{1,2(1,2 - 1 \cos 9,79^\circ)}{0,2041} = 1,262 \text{ v.e.} \quad (126,2 \text{ MVAr})$$

$$Q_R = \frac{1(1,2 \cos 9,79^\circ - 1)}{0,2041} = 0,894 \text{ v.e.} \quad (89,4 \text{ MVAr})$$

azaz a meddő teljesítmény az S végtől az R felé áramlik.

A 3. esetben:

– δ ugyanakkora mint a 2. esetben és $Q_S = - 0,894 \text{ v.e.}$, $Q_R = - 1,262 \text{ v.e.}$ azaz a meddő teljesítmény az R végtől az S felé áramlik.