Partner

MAGYAR RÉZPIACI KÖZPONT

Az LPQI-VES társfinanszírozója:

Education and Culture

Leonardo da Vinci

Az LPQI rész a

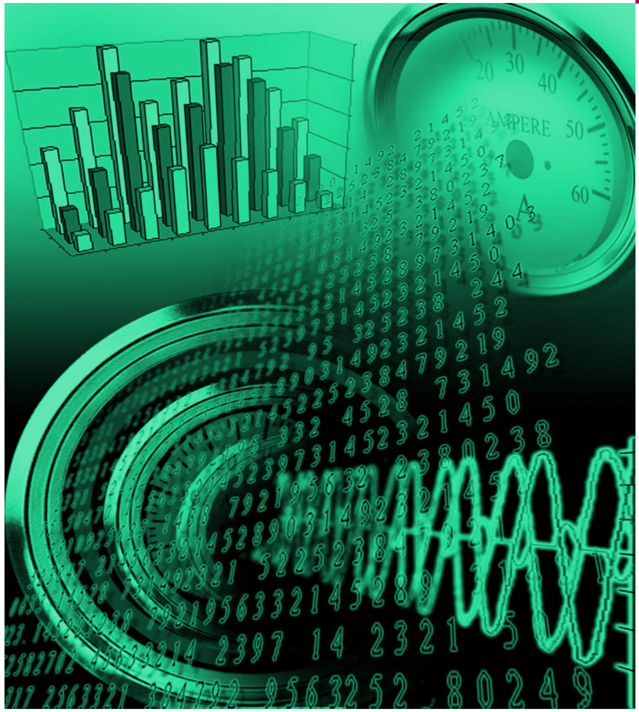
Leonardo ENERGY

Meddőenergia kompenzálás elmélete és alkalmazása

Dr. Dán András

Az MTA doktora, BME VET

dan@vmt.bme.hu



LPQIVES Tanfolyam

Meddőenergia kompenzálás

Budapest, MEE

2007. február 22.

LEONARDO POWER QUALITY INITIATIVE

Bevezetés

- Ideális energiarendszer
  - U állandó és szimmetrikus
  - U egyfrekvenciás
  - F állandó
  - Teljesítménytényező: 1
- Következmény:
  - Fogyasztók optimumra méretezhetők
  - Fogyasztók kölcsönhatása megszűnik

Bevezetés

- Valóság: tolerancia sáv
  - Feszültségtartás
  - Aszimmetria
  - Harmonikus torzítás
  - Egyéb feszültségminőségi paraméterek
  - Frekvencia
  - Teljesítménytényező

Bevezetés

Meddőteljesítmény kompenzáció

- Fogyasztói
  - Teljesítménytényező javítás
  - Feszültségszabályozás
  - Terhelés szimmetrizálás
- Hálózati
  - Elosztóhálózati (telj tényező, fesz tartás)
  - Átviteli hálózati (fesz tartás, stabilitási tartalék növelés)

Felelősség megosztás

MSZ EN 50160
Feszültségminőség előírások

Csatlakozási feltételek

Ki miért felelős

Fogyasztó-szolgáltató határpont

Megoldások egyik változata:kompenzálás

Ideális kompenzátor

- Késleltetés nélküli
- Állandó feszültséget tart
- Fázisonként független
- Nem termel harmonikust

Kompenzálandó fogyasztók

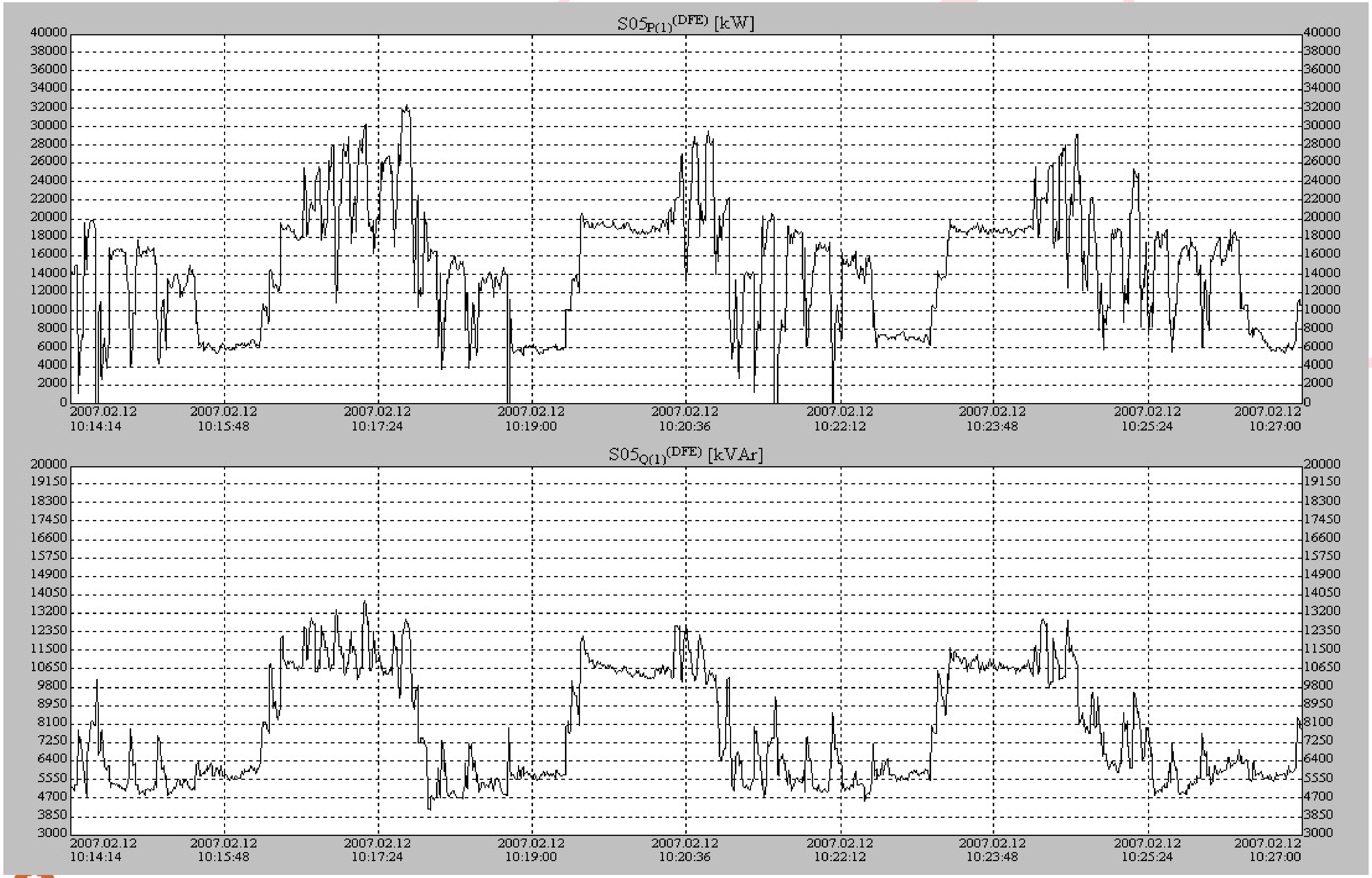
Egyéb megoldások:

- Zárlati teljesítmény növelés (pl szinkronmotor)
- Lágyindítás

HUNGARIAN COPPER PROMOTION CENTRE

www.lpqi.org

Példa kompenzálandó fogyasztóra



HUNGARIAN COPPER PROMOTION CENTRE

www.lpqi.org

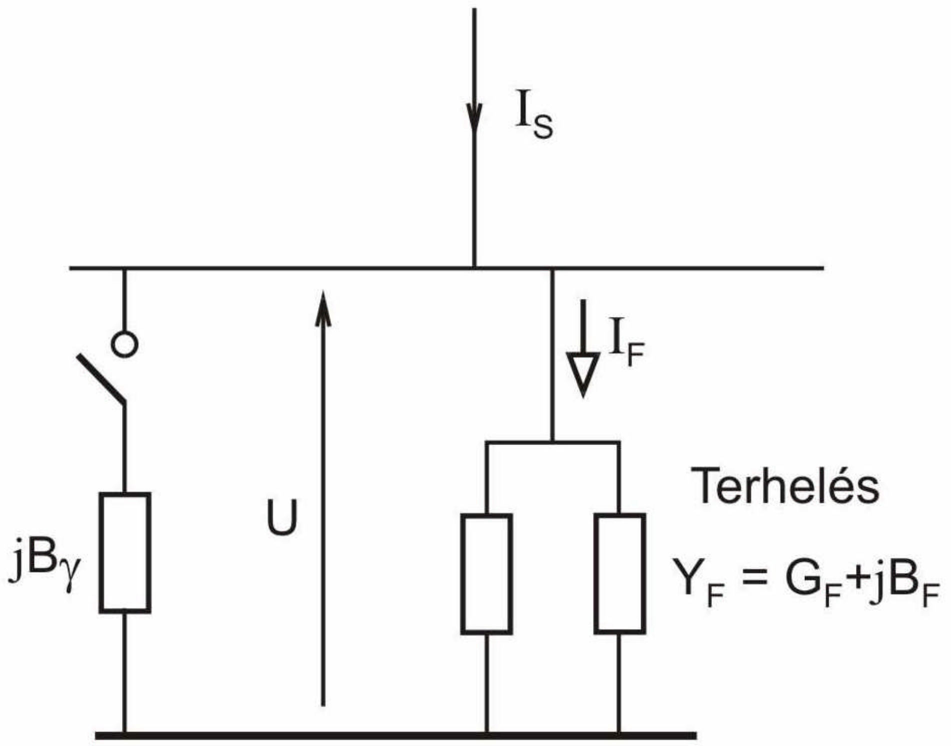
A táphálózat, a terhelés és a kompenzátor kölcsönhatása

Kvázistacioner állapot $\rightarrow$ fazor egyenletek

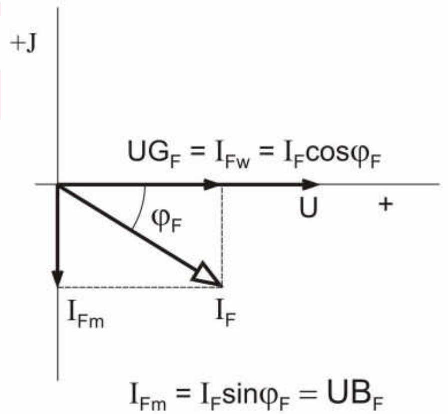
Tranziens állapot $\rightarrow$ differenciál egyenletek

Cos φ javítás

$$I_F = U(G_F + jB_F) =$$
$$= UG_F + jUB_F$$
$$S_F = U\hat{I}_F =$$
$$= U^2 G_F - jU^2 B_F =$$
$$= P_F + jQ_F$$



Kompenzátor nélkül: $I_S = I_F$



Kompenzátorral:

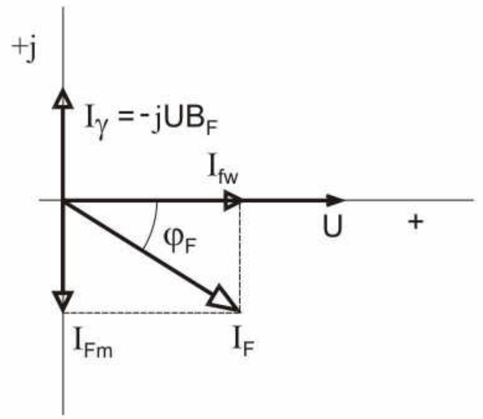
$$I_S = I_F + I_\gamma = U(G_F + jB_F)$$

$$-UjB_F = I_{FW}$$

$$S_\gamma = P_\gamma + jQ_\gamma = U\hat{I}_\gamma = U(jUB_F) = jU^2B_F$$

Teljes kompenzálás: $P_\gamma = 0; \quad Q_\gamma = -Q_F$

Részleges kompenzálás: $|Q_\gamma| < |Q_F|$



Feszültségszabályozás

Definíció

$$R_F = \frac{|E| - |U|}{|U|}$$

U a referencia fazor

$$R_F = \frac{|E| - U}{U}$$

$$\Delta U = I_F Z_S; \quad I_F = \frac{\hat{S}_F}{U} = \frac{P_F - jQ_F}{U}$$

$$\Delta U = \frac{P_F - jQ_F}{U}\left(R_S + jX_S\right)$$

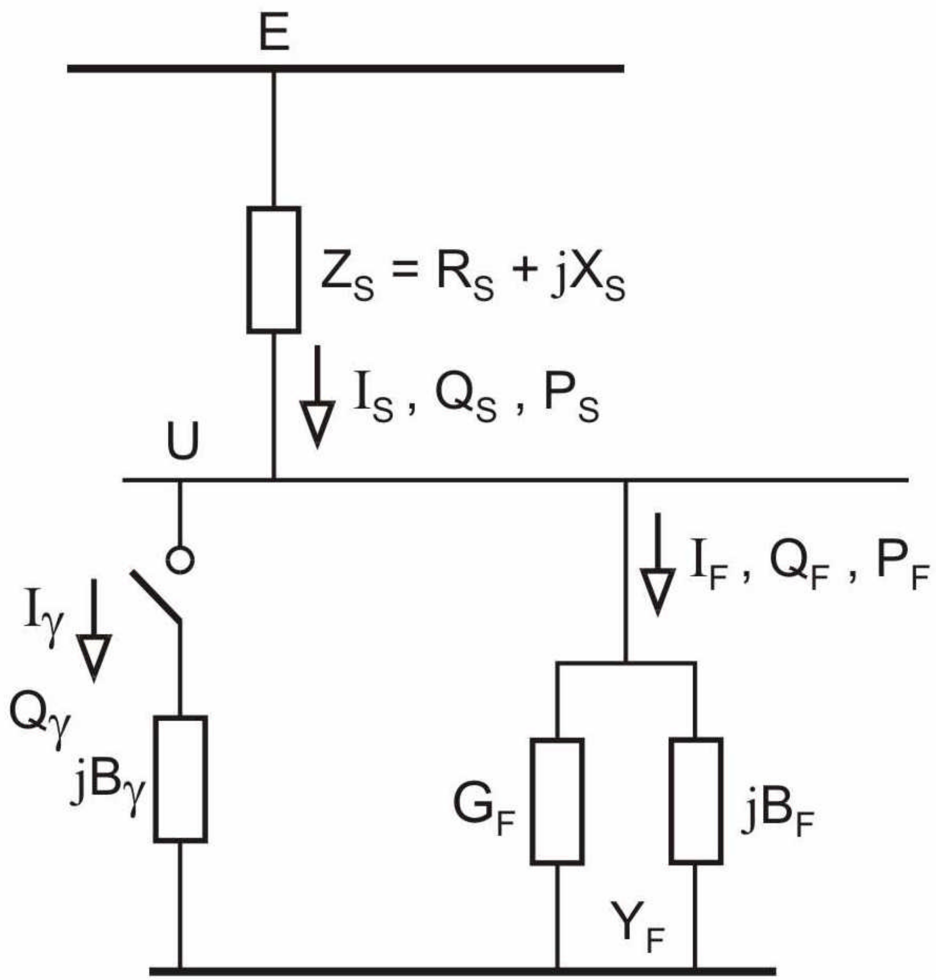
$$\Delta U = \frac{P_F R_S + Q_F X_S}{U} + j\frac{P_F X_S - Q_F R_S}{U} = \Delta U_h + j\Delta U_k$$

Kompenzátorral:

$$Q_S = Q_\gamma + Q_F$$

$$E = U + \Delta U =$$

$$= U + \Delta U_h + j\Delta U_k$$



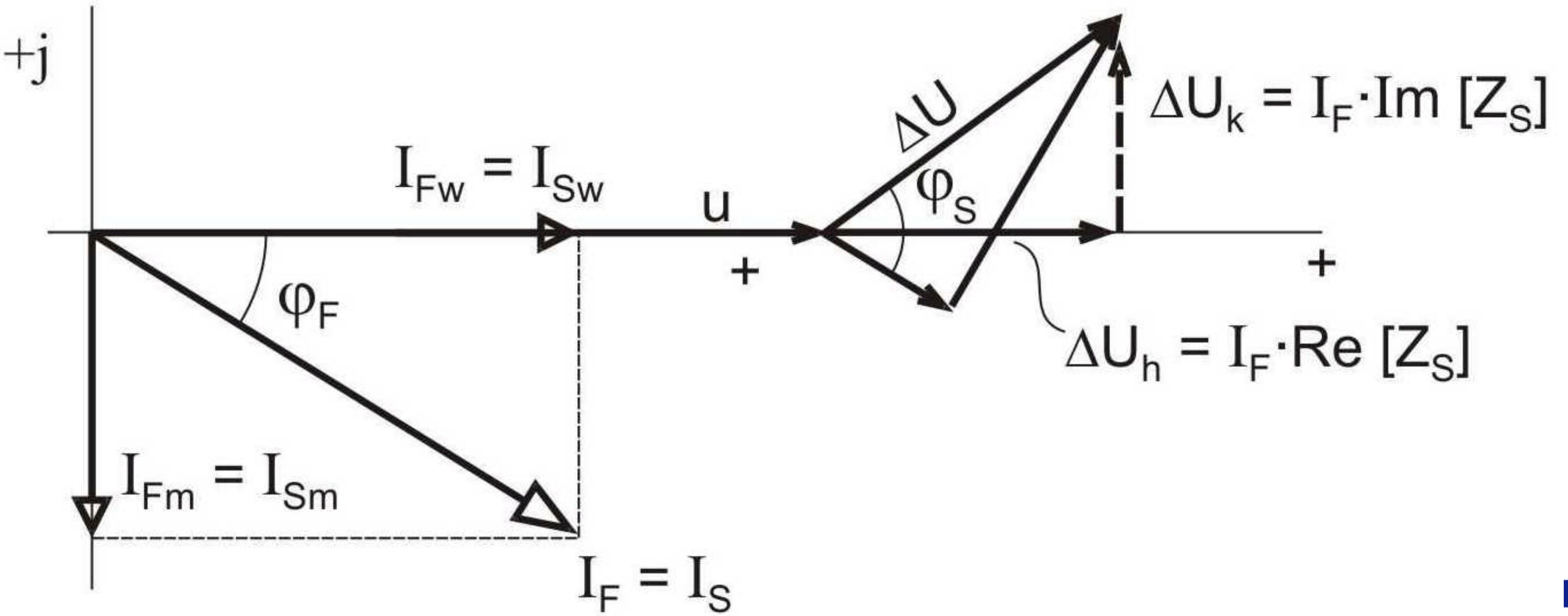
Legyen

$$|E| = U$$

$$E\cos\varphi = U + \Delta U_h$$

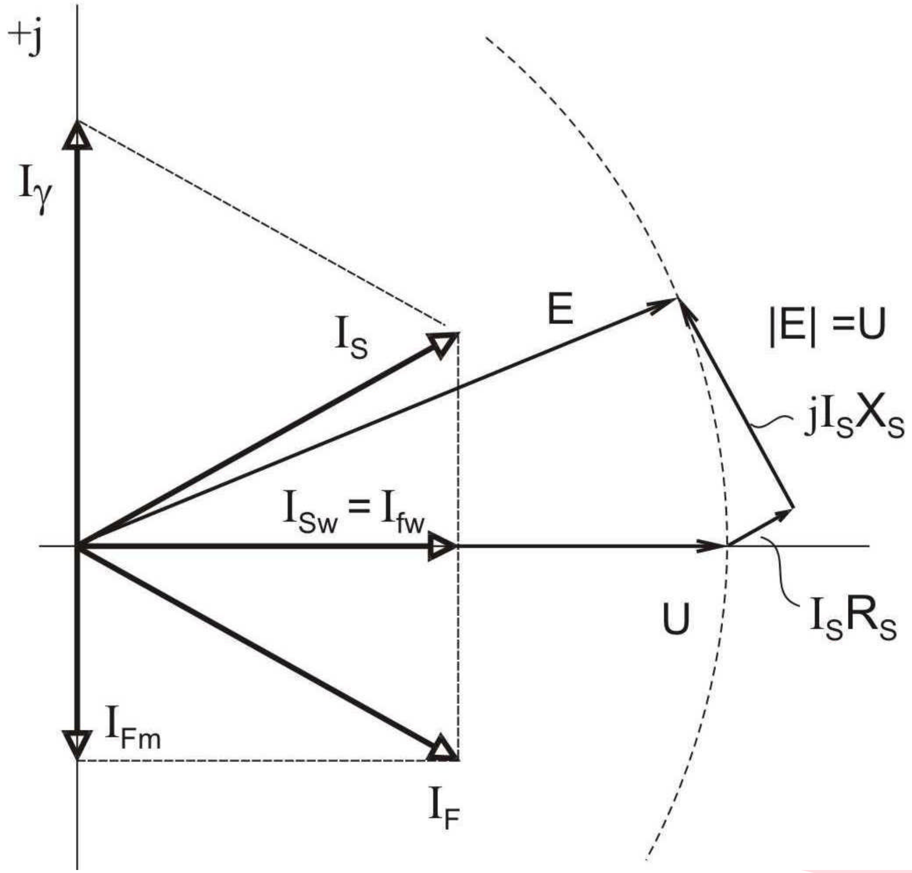
$$E\sin\varphi = \Delta U_k$$

$$|E|^2 = \left[U + \frac{R_S P_F + X_S Q_S}{U}\right]^2 + \left[\frac{X_S P_F - R_S Q_S}{U}\right]^2$$



$$I_{Sw} = I_{Fw}$$

$$|E| = U$$



Tiszta reaktív kompenzátor tart állandó U feszültséget a wattos és meddő terhelés változás ellenére.

Cos φ kompenzátor

esetén cosφ = 1-re kompenzálva

$$Q_S = Q_\gamma + Q_F = 0$$

$$\Delta U = \frac{P_F}{U}\left(R_S + jX_S\right) = \frac{P_F R_S + jP_F X_S}{U}$$

A feszültségváltozás tehát nem függvénye a fogyasztói meddőteljesítmény változásának.

Tehát a pillanatnyi feszültségtartás és meddőkompenzáció ugyanazon kompenzátorral nem teljesíthető.

De: U ≈ állandó és cosφ ≈ 1

Feszültségszabályozási karakterisztika

Kompenzátor nélkül:

$$\frac{\Delta U}{U} = Z_S \frac{P_F - jQ_F}{U^2} = \frac{P_F - jQ_F}{S_Z}$$

$$E \approx U \Rightarrow \quad \frac{U^2}{Z_S} \approx S_Z$$

$$R_S = \frac{U^2}{S_Z}\cos\varphi_S \qquad X_S = \frac{U^2}{S_Z}\sin\varphi_S$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{S_Z}(\cos\varphi_S + j\sin\varphi_S)(P_F - jQ_F) =$$

$$= \frac{1}{S_Z}\left[(\cos\varphi_S P_F + \sin\varphi_S Q_F) + j(\sin\varphi_S P_F - \cos\varphi_S Q_F)\right]$$

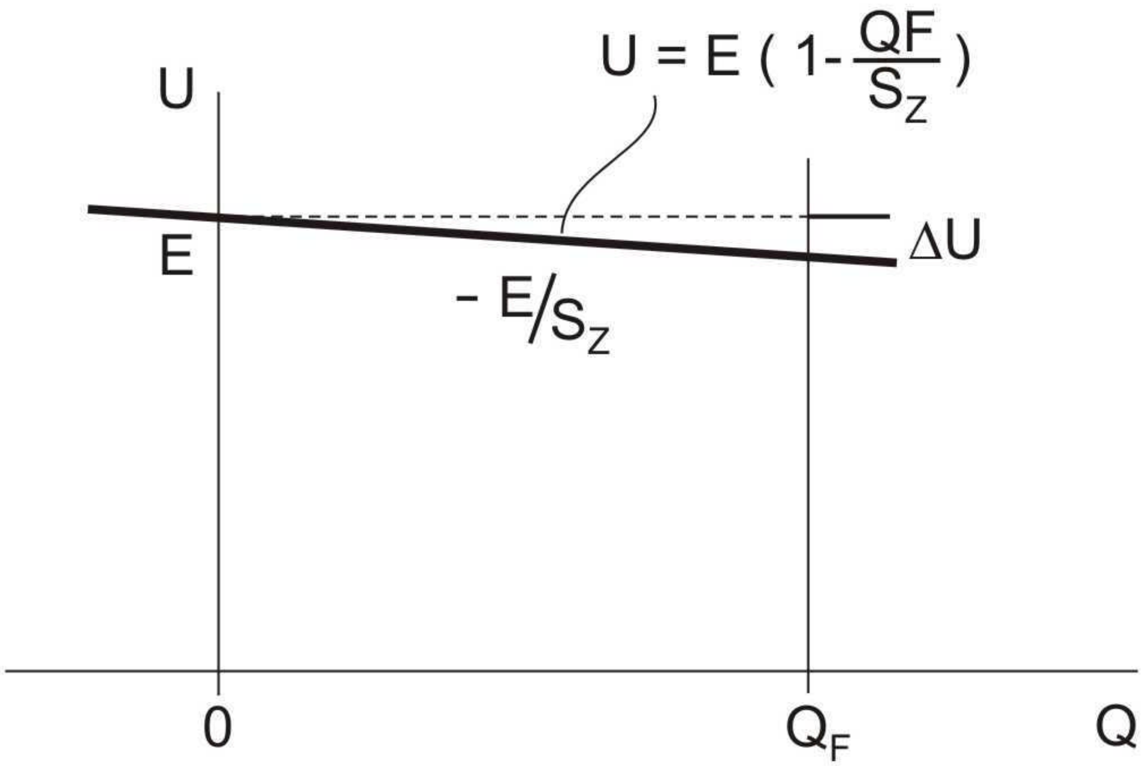
$$\frac{\Delta U_h}{U} = \frac{1}{S_Z}(\cos\varphi_S P_F + \sin\varphi_S Q_F) \approx \frac{\Delta U}{U}$$

$$\frac{R}{X} \langle\langle 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta U_h}{U} \approx \frac{1}{S_z}\Delta Q_F \sin\varphi_S \approx \frac{\Delta Q_F}{S_z} \Rightarrow$$

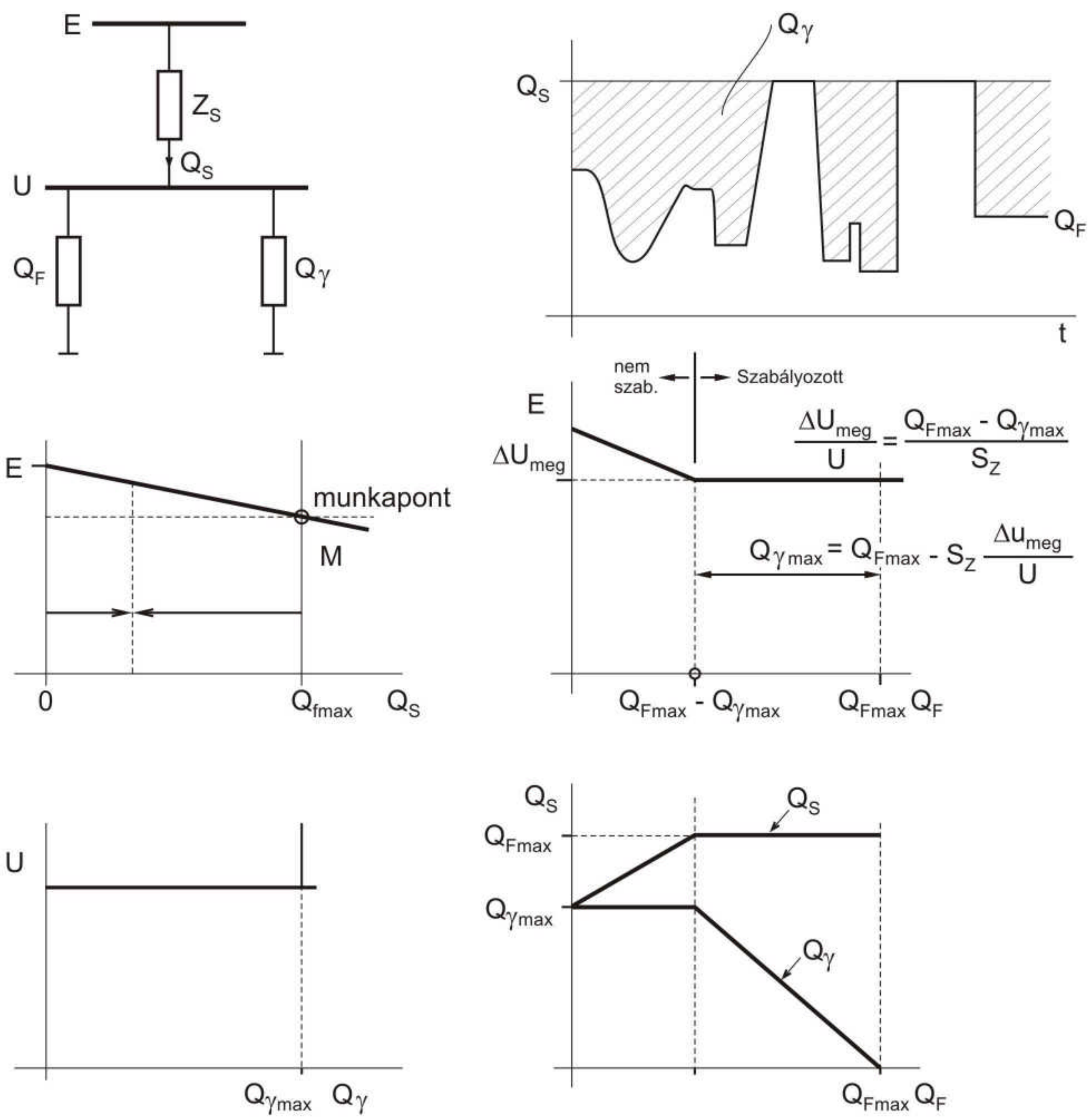
$$\Rightarrow \Delta U_h = U\frac{\Delta Q_F}{S_z}$$

$$\Delta U_h \approx E - U; \quad U = E - U\frac{\Delta Q_F}{S_z}\Big|_{E \approx U} \approx E\left(1 - \frac{\Delta Q_F}{S_z}\right)$$

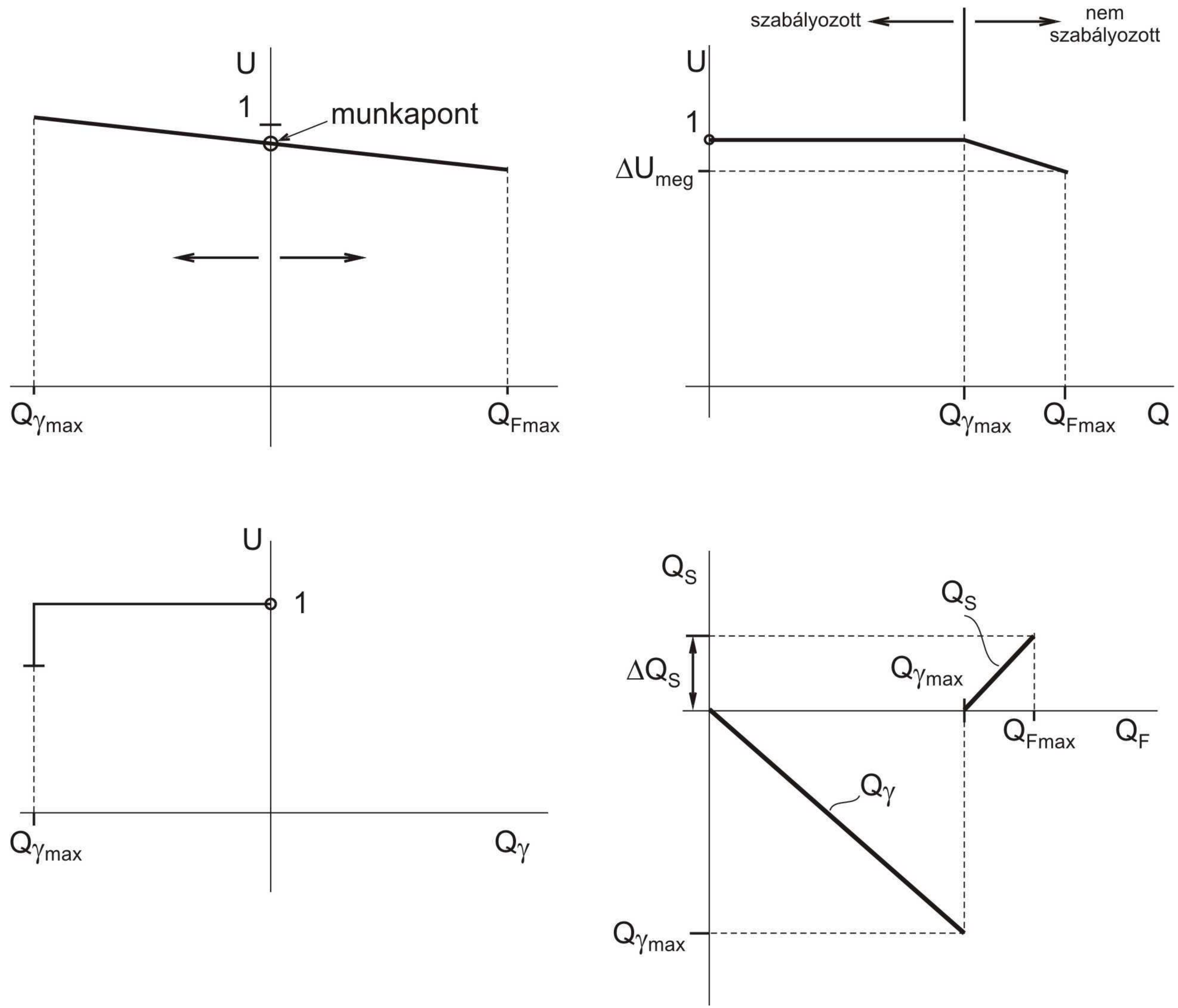
Hálózat karakterisztikája



Induktív terhelés és induktív kompenzátor



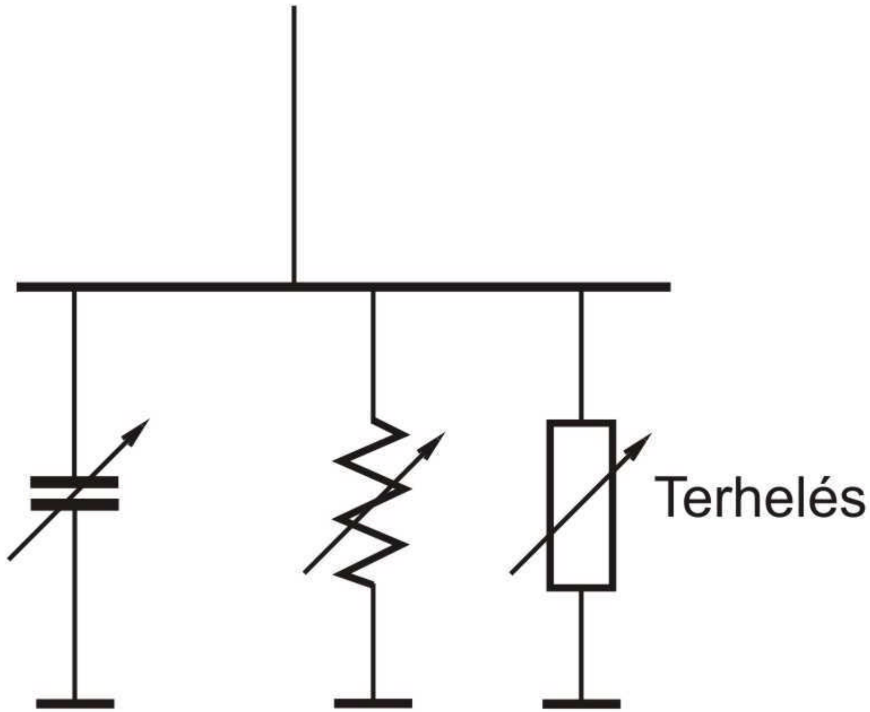
Kapacitív kompenzátor meddőegyensúly ábra



HUNGARIAN COPPER PROMOTION CENTRE

Kétirányú kompenzálás

- Változatok (TCR+FC, TSC+FR,)



Fogyasztói kompenzálás mint feszültségszabályozó

A kompenzátor szabályozási karakterisztikájának jellemzői:

- A Q_γ = 0-hoz tartozó kezdeti feszültség U_k
- A névleges (maximális) meddő $Q_{\gamma n}$ $Q_{\gamma max}$
- A differenciális meredekség: K_γ

A meredekség definíciója:

$$K_\gamma = \frac{\Delta Q_\gamma}{\Delta U}$$

Ha a karakterisztika $Q_\gamma < Q_{\gamma max}$-ig lineáris,

$$U = U_k + \frac{Q_\gamma}{K_\gamma}$$

Az ideális kompenzátornál:

$$K_\gamma = \infty \qquad (U = U_k = \text{const})$$

K_γ értéke általában 20 - 100(v.e.)

Nagy érték csökkenti a kompenzátor munkaponti stabilitását.

Feltételek: $S_z \neq \infty; \quad X_S/R_S \rangle\rangle 1; \quad P_F \approx \acute{a}lland\acute{o};$

szimmetrikus üzem

$$Q_S = Q_F + Q_\gamma$$

$$U = E\left(1 - \frac{Q_S}{S_z}\right)$$

A terhelés karakterisztikája

érzékenység:

$$\Rightarrow \frac{dU}{dQ_S} = -\frac{E}{S_z}$$

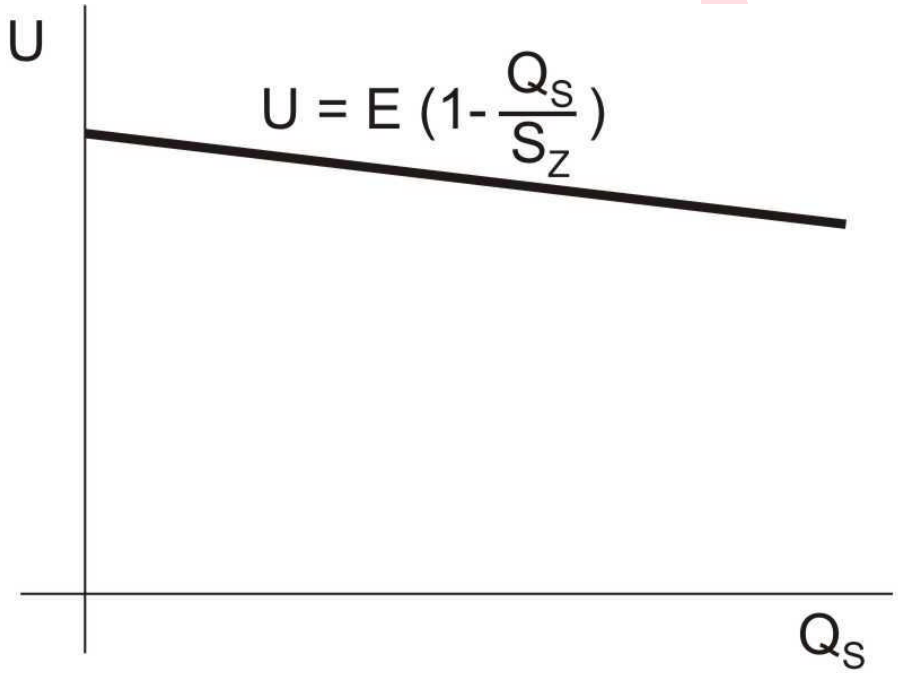
merev rendszer

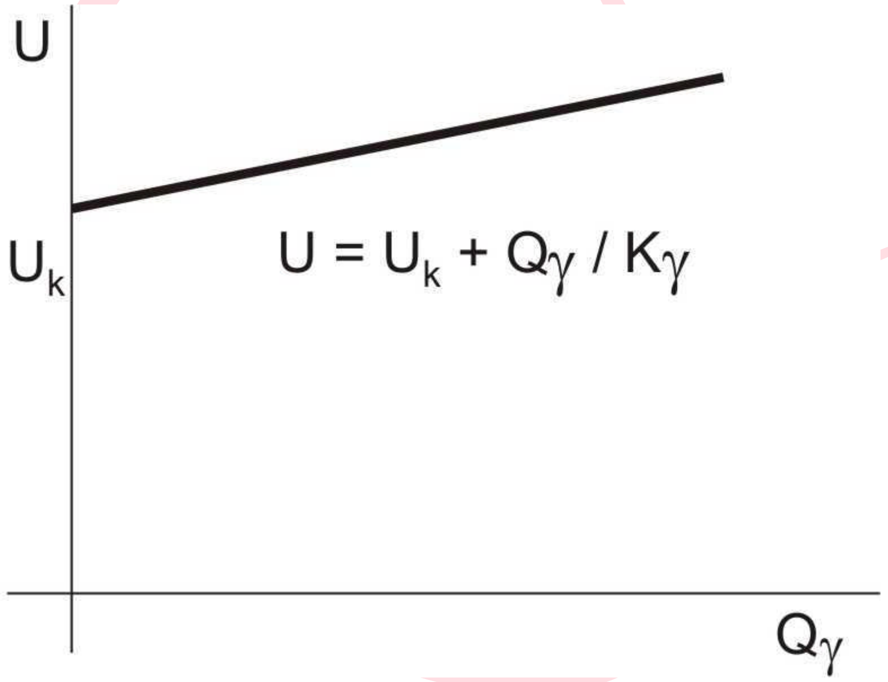
.

$$S_z \uparrow \Rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta Q_S} \downarrow$$

nagy zárlati teljesítmény

A hálózat és a kompenzátor linearizált karakterisztikája





Csak terhelés esetén:

$$U = E\left(1 - \frac{Q_F}{S_z}\right)$$

Kompenzátorral:

$$U = E\left(1 - \frac{Q_S(U)}{S_z}\right); \quad \text{mivel} \quad Q_S = Q_\gamma + Q_F$$

$$\text{és} \quad Q_\gamma = f(U) \quad Q_\gamma = K_\gamma (U - U_k)$$

Áttérve viszonylagos egységekre:

$$U_{alap} = E; \quad S_{alap} = Q_{\gamma \max}$$

$$U = E\left(1 - \frac{Q_F + K_\gamma (U - U_k)}{S_z}\right)$$

$$S_z U = E\left(S_z - Q_F - K_\gamma (U - U_k)\right)$$

$$U\left(S_z + K_\gamma E\right) = ES_z - Q_F E + EK_\gamma U_k$$

$$U = \frac{ES_z + EK_\gamma U_k}{S_z + K_\gamma E} - \frac{EQ_F}{S_z + K_\gamma E}$$

$$U = \frac{ES_z\left(1 + K_\gamma U_k / S_z\right)}{S_z\left(1 + K_\gamma\, E / S_z\right)} - \frac{ES_z \dfrac{Q_F}{S_z}}{S_z\left(1 + K_\gamma\, E / S_z\right)}$$

$$U = E\left[\frac{1 + K_\gamma\, U_k / S_z}{1 + K_\gamma\, E / S_z} - \frac{Q_F / S_z}{1 + K_\gamma\, E / S_z}\right]$$

Ha $Q_\gamma < Q_{\gamma\,\max}$,

a hatás kettős:

- megváltozott az üresjárási feszültség a tápponton
- megváltozott a feszültségérzékenységi tényező

$$\frac{dU}{dQ_F} = -\frac{E/S_z}{1 - K_\gamma E/S_z} \qquad (K_\gamma > 0)$$

Példa

Q_γ = 10 MVA S_z = 25 v.e. E = 1 v.e. K_γ =100 v.e

A kompenzálatlan érzékenység:

$$-\frac{E}{S_z} = -0.04 \text{ v.e.}$$

Kompenzátorral:

$$\frac{-0.04}{1+100\cdot 0.04} = -0.008 \ \text{ v.e.}$$

Ha Uk = E, akkor a két esetben azonos az üresjárási feszültség.

Példa

A kompenzátor meddőteljesítménye a fogyasztói meddő függvényében:

$$Q_\gamma = \frac{K_\gamma}{1+K_\gamma E/S_z}\left[E\left(1-\frac{Q_F}{S_z}\right)-U_k\right]$$

Ha

$$E = U_k$$

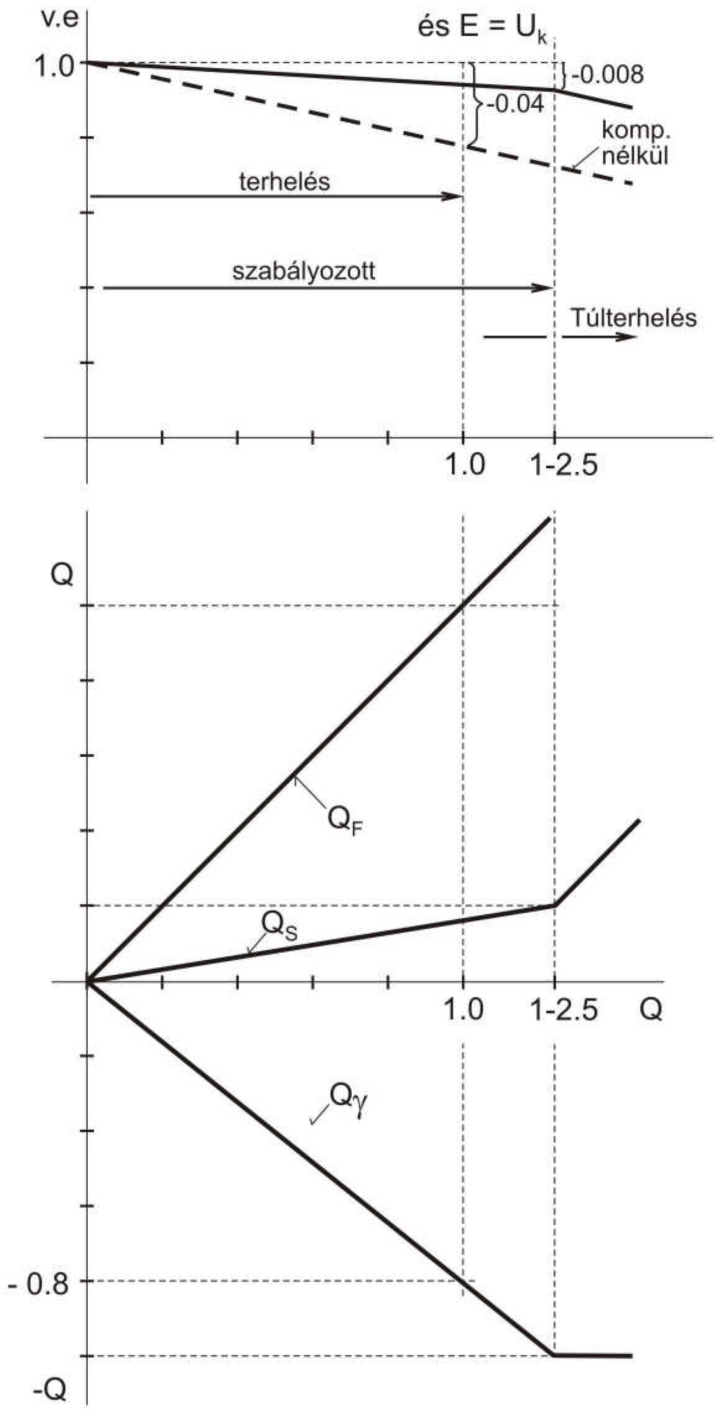
$$Q_\gamma = -\frac{K_\gamma E/S_z}{1+K_\gamma E/S_z}$$

Pl.

$-Q_{\gamma max} = Q_{Fmax} = 10$ MVA $K_\gamma = 100$ $S_z = 25$ v.e.

$$Q_\gamma = \frac{-0.04\cdot 100}{1+100/25}\cdot 1 = -0.8 \text{ v.e.} \rightarrow \text{-8 Mvar}$$

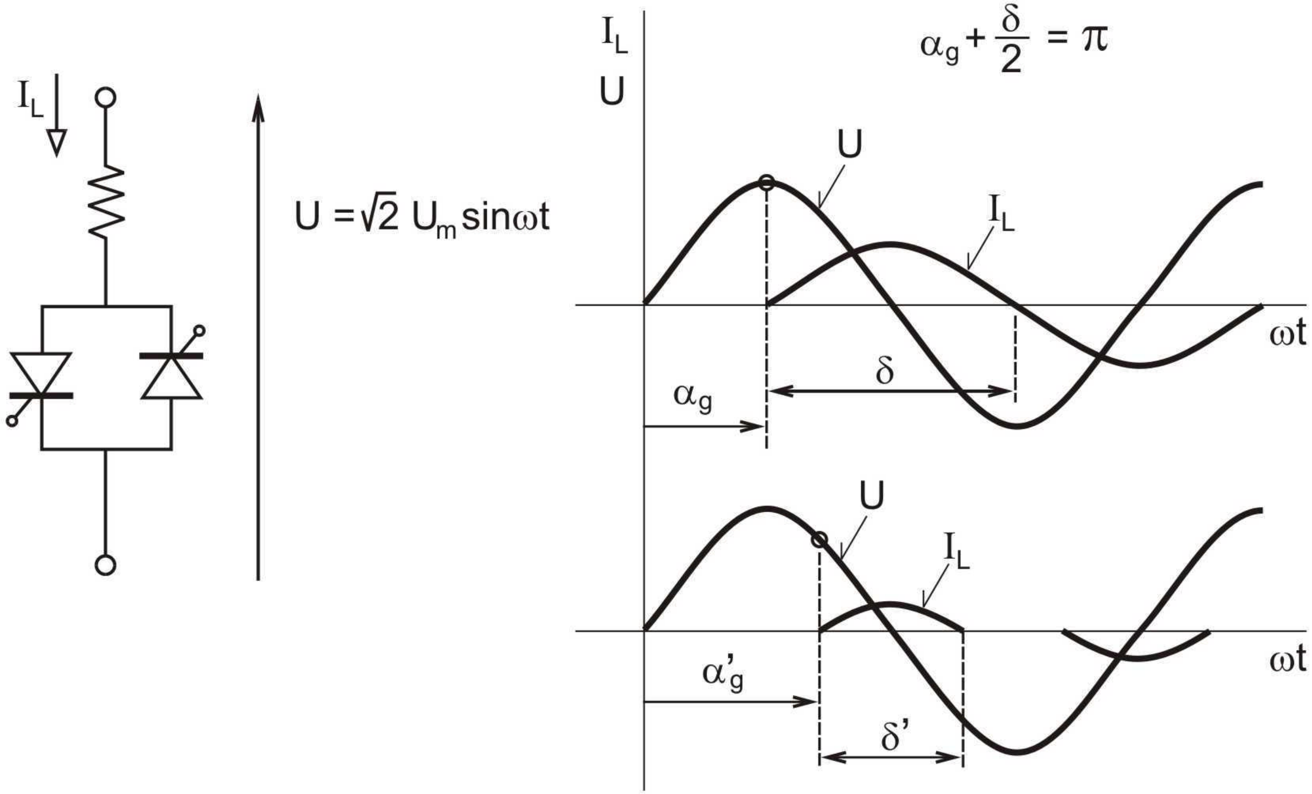
Példa



M8a.)

M8b.)

Alaptípusok TCR



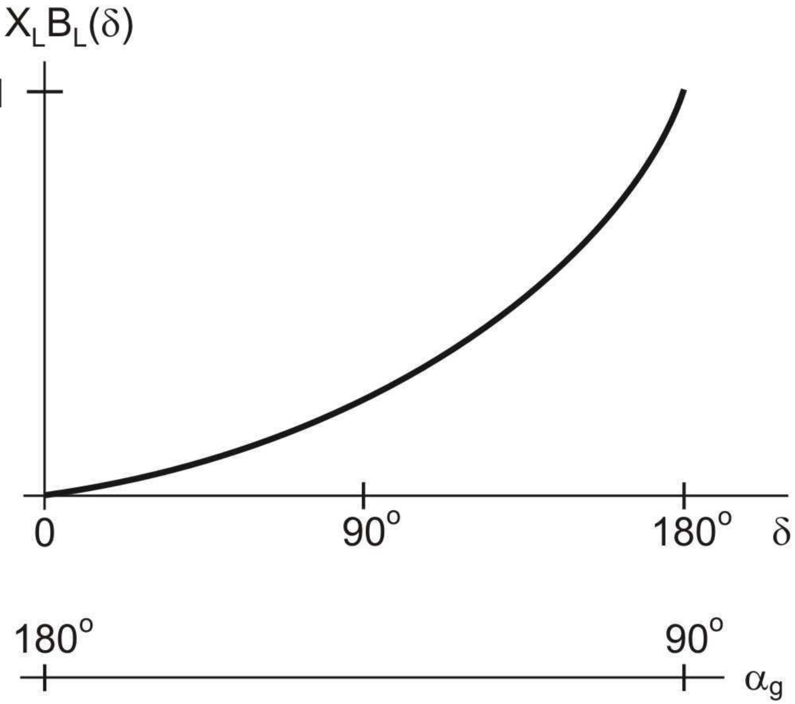
TCR egyenletek

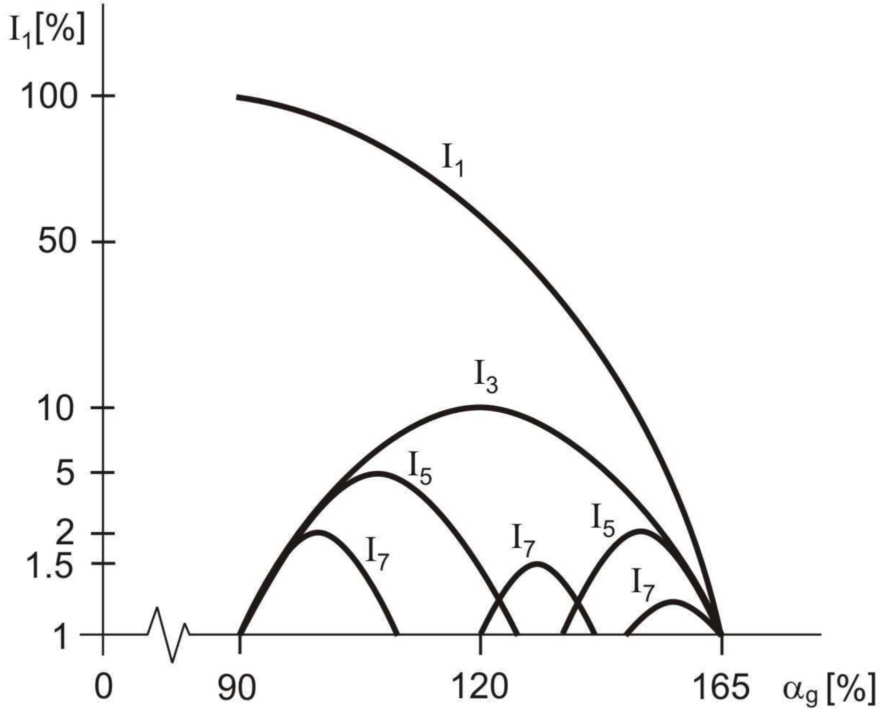
$$i = \begin{cases} \dfrac{\sqrt{2}U}{X_L}\left(\cos\alpha - \cos\omega t\right) & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma \le \omega t < \alpha + \pi \end{cases}$$

$$I_1 = \underbrace{\frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi X_L}}_{B_L(\sigma)} U \qquad \left[A_{eff}\right]$$

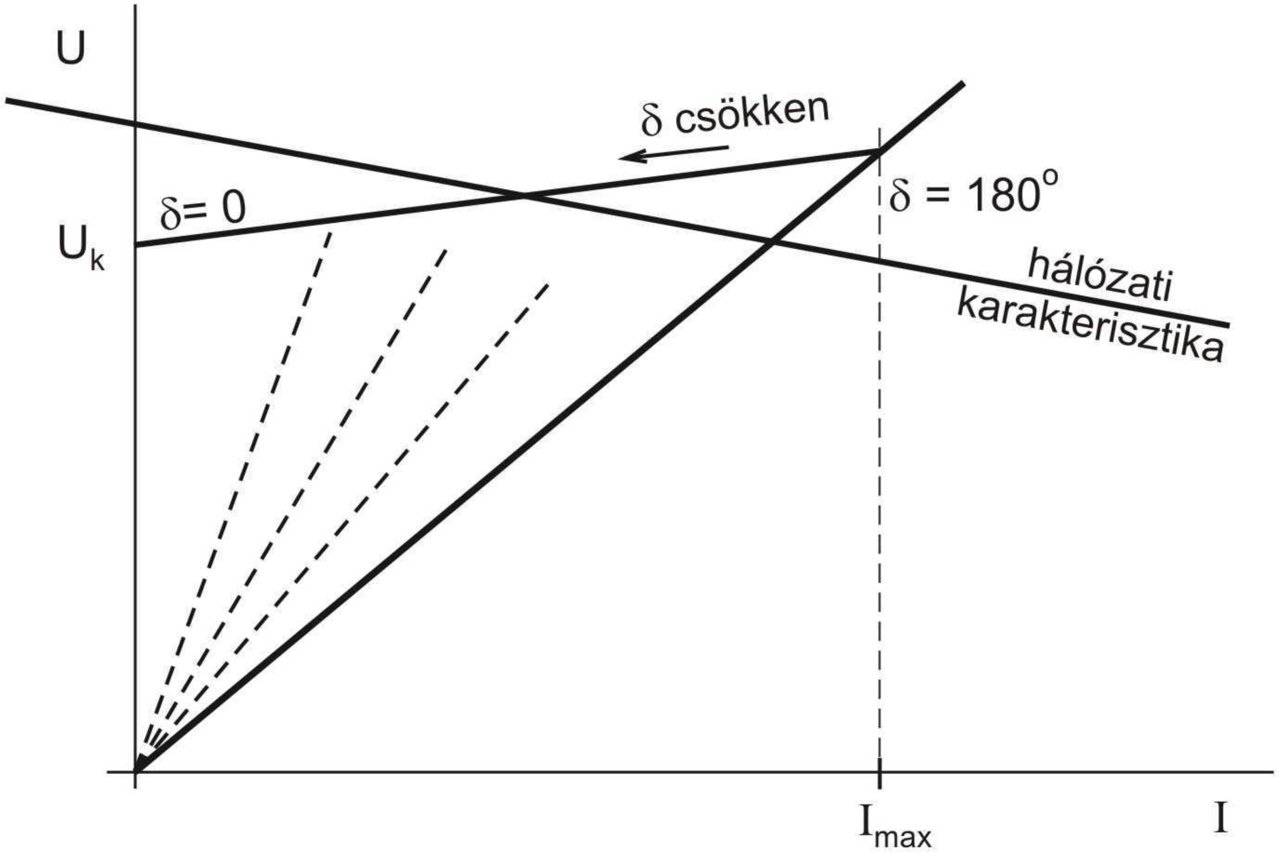
$$I_h = \frac{4}{\pi}\frac{U}{X_L}\left[\frac{\sin\left(h+1\right)\alpha}{2\left(h+1\right)} + \frac{\sin\left(h-1\right)\alpha}{2\left(h-1\right)} - \cos\alpha\frac{\sinh\alpha}{h}\right]$$

Alaptípusok TCR

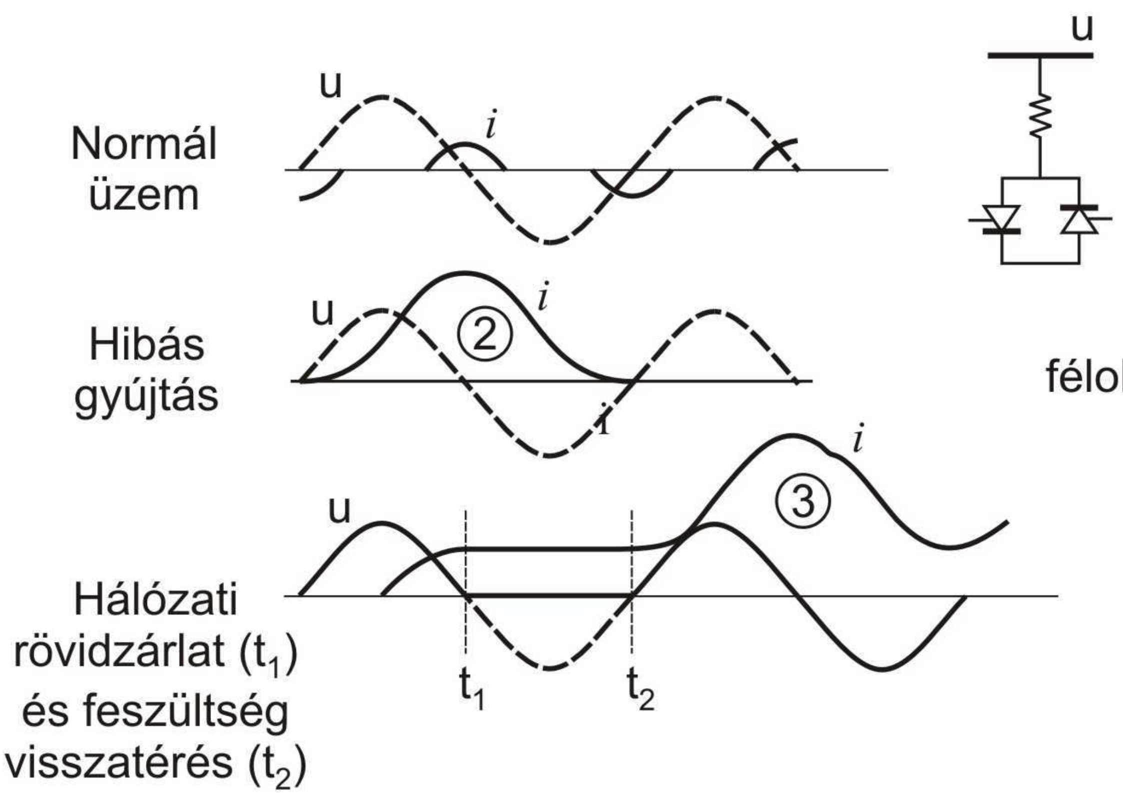




TCR karakterisztika



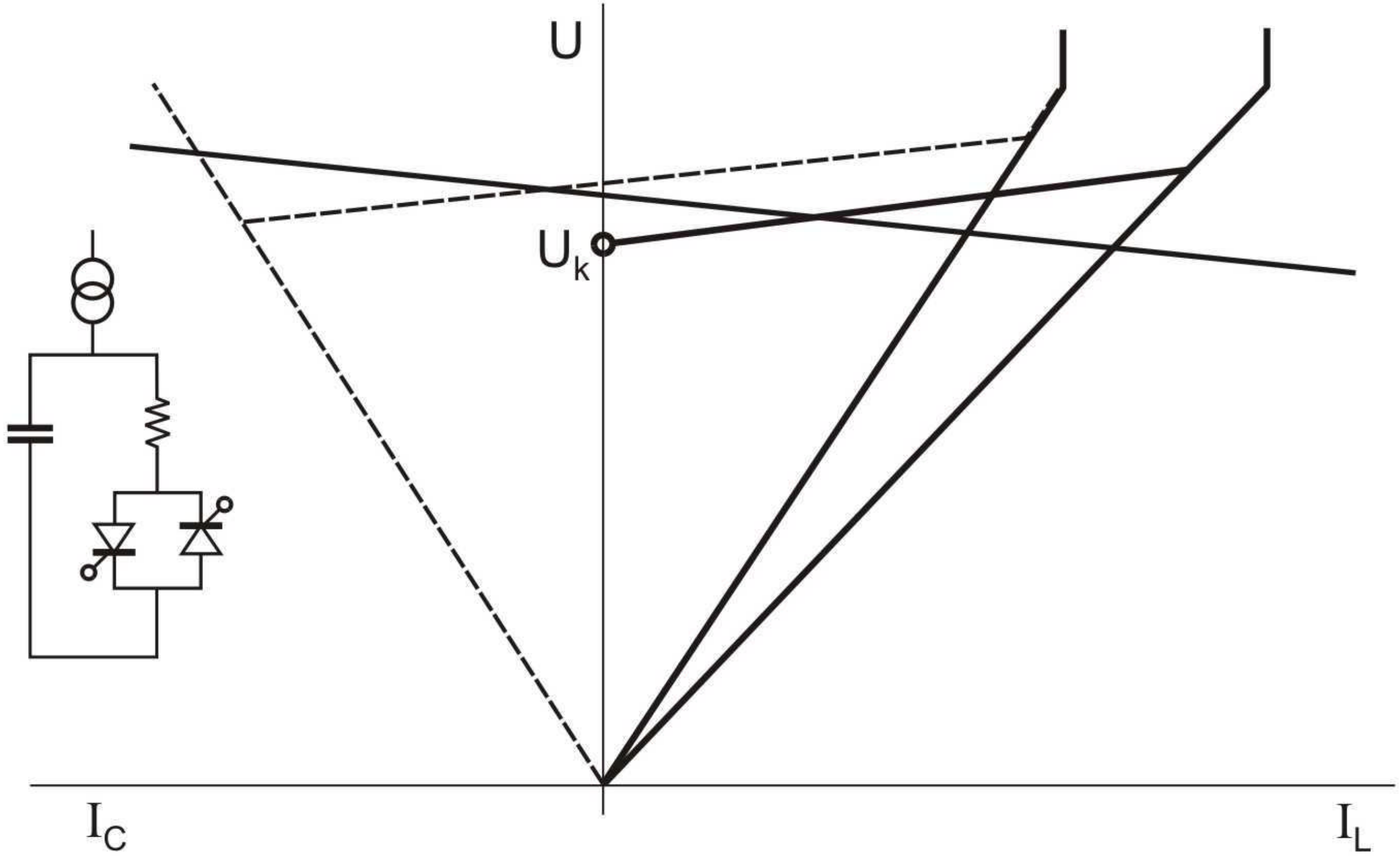
TCR üzeme



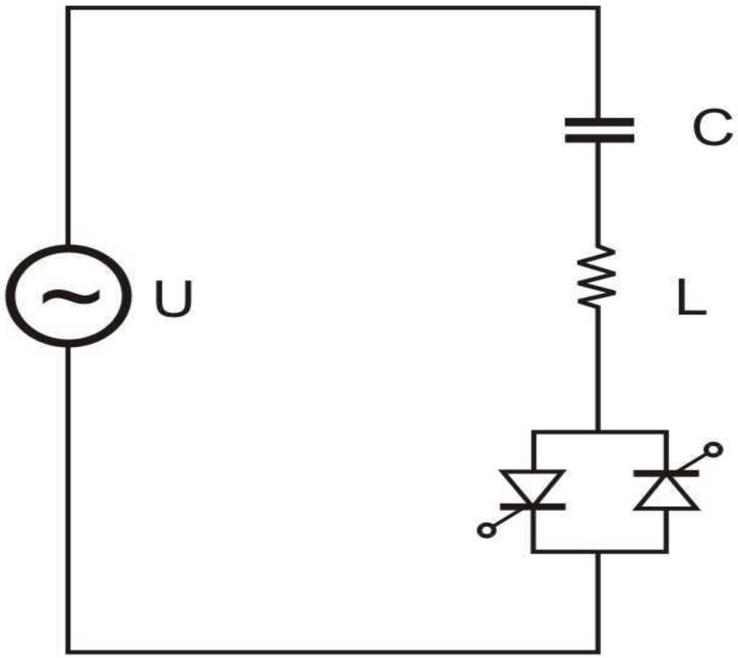
TCR

féloldali gyútáskimaradás $i = \frac{1}{L}\int u\,dt$

Alaptípusok TCR+FC



Alaptípusok TSC

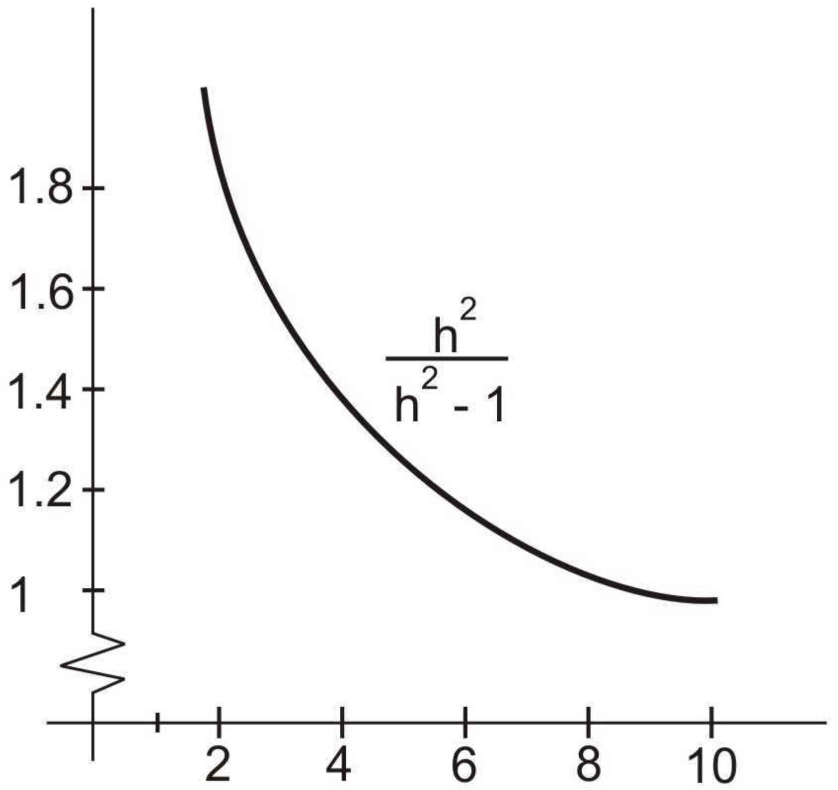


$U = U_m \sin(\omega_o t + \alpha)$

$$U_m \sin(\omega_1 t + \alpha) = Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i dt$$

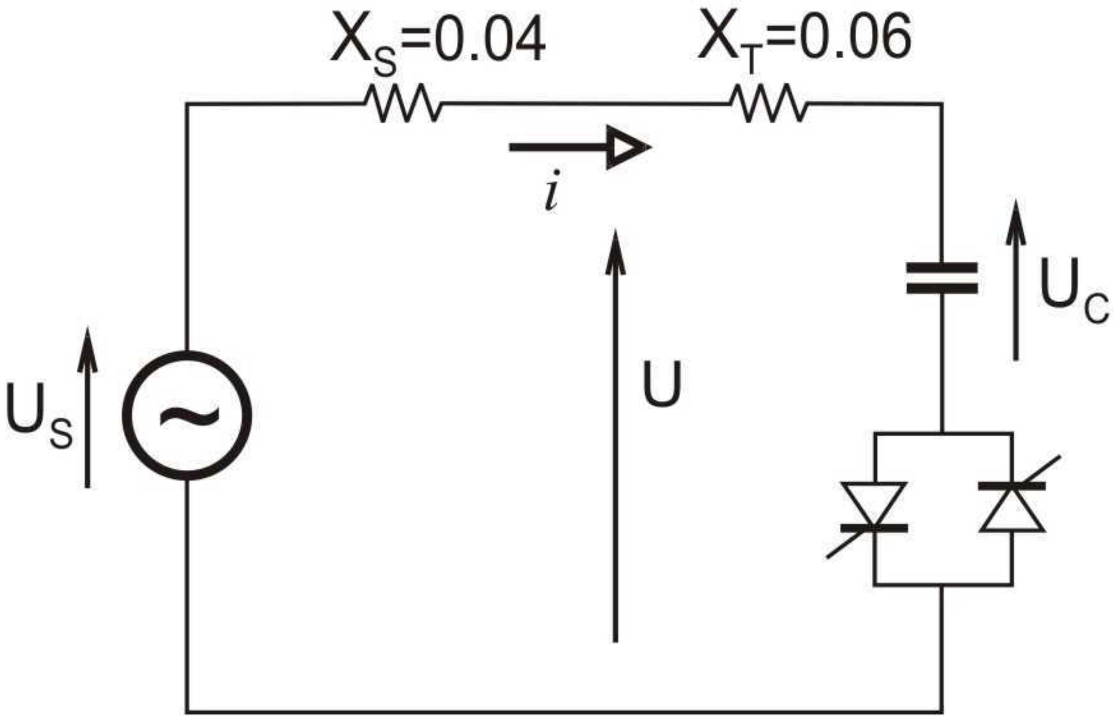
$$i(t) = I_m \cos(\omega_1 t + \alpha) - h\omega_1 C\left(U_{C0} - \frac{h^2}{h^2 - 1}U_m \sin\alpha\right)\sinh\omega_1 t - I_m \cos\alpha \cosh\omega_1 t$$

TSC elemek igénybevétele

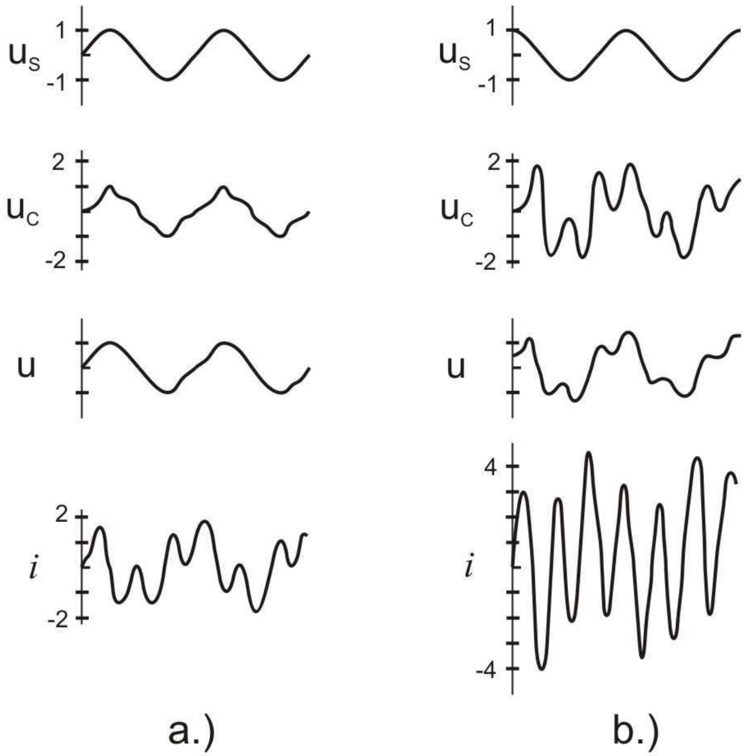


$$h = \frac{\omega_h}{\omega_o} = \frac{h\omega_o}{\omega_o}$$

Alaptípusok TSC



TSC üzeme



Kapcsolási tranziensek kisütött kondenzátorral

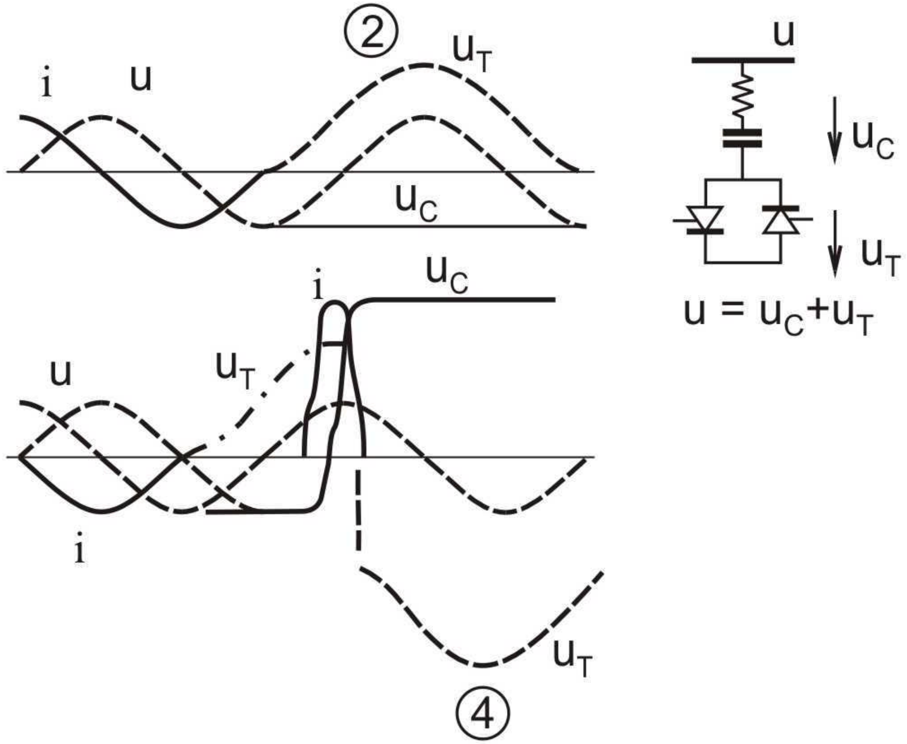
a.) Gyújtás, ha $u_{C0} = 0 = u$

b.) $dv/dt = 0$

TSC üzeme

Normál üzem

Hibás gyújtás



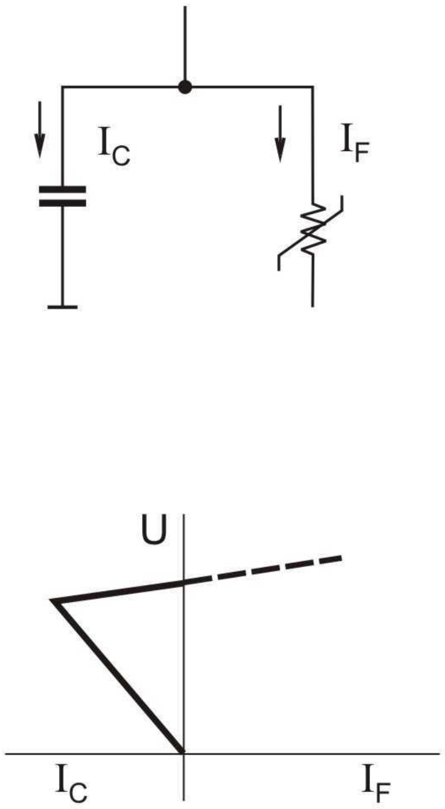
TSC

Hibás gyújtás hatására

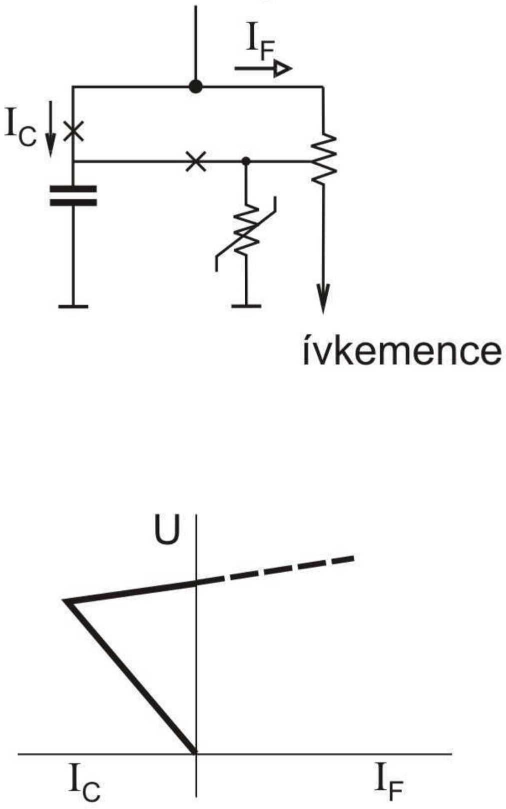
a tirisztoron fellépő túlfeszültség (tartós)

Telítődő fojtó

Telítődő fojtó

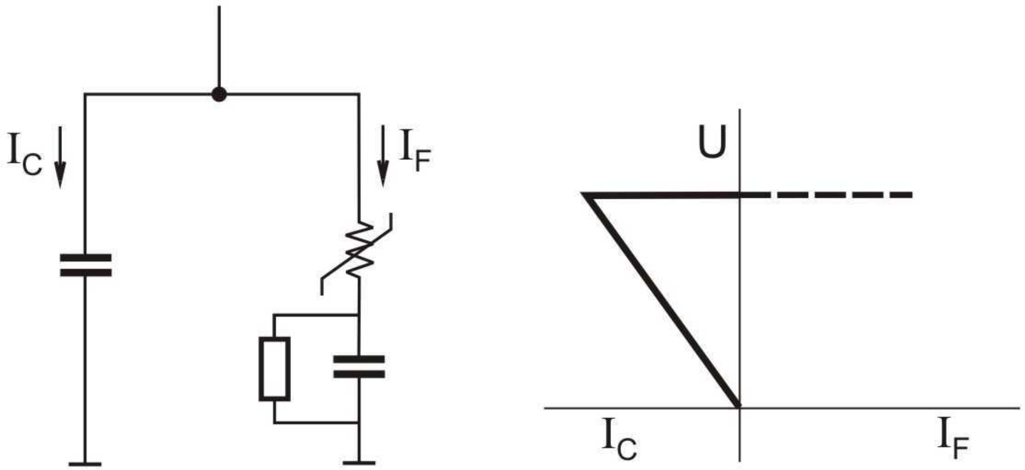


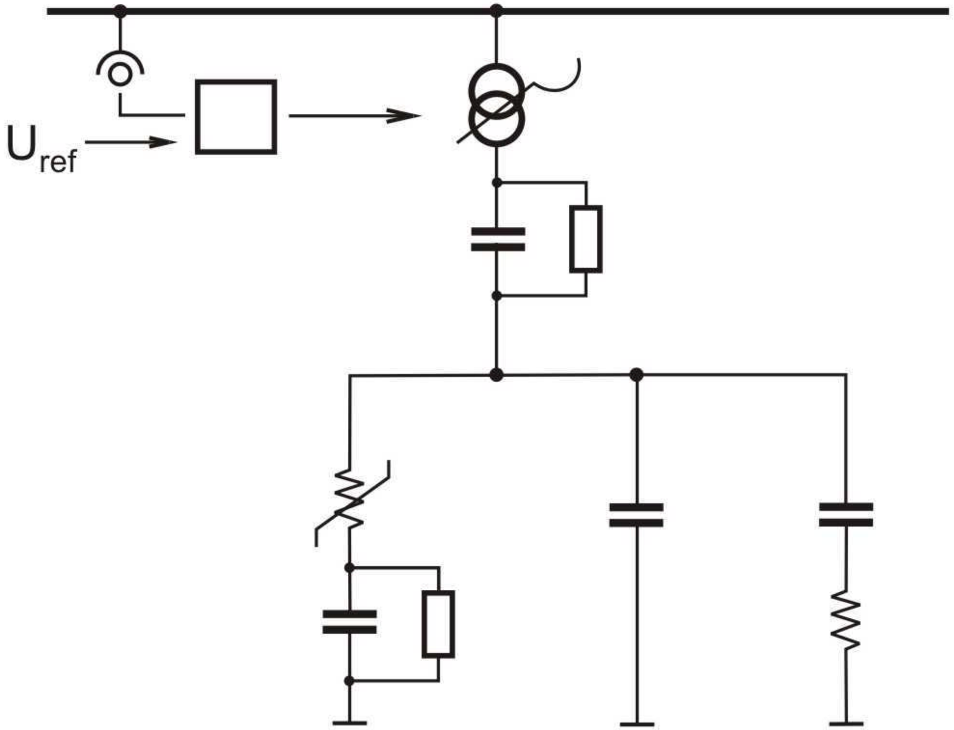
Telítődő fojtó
+ megcsapolásos lineáris fojtó



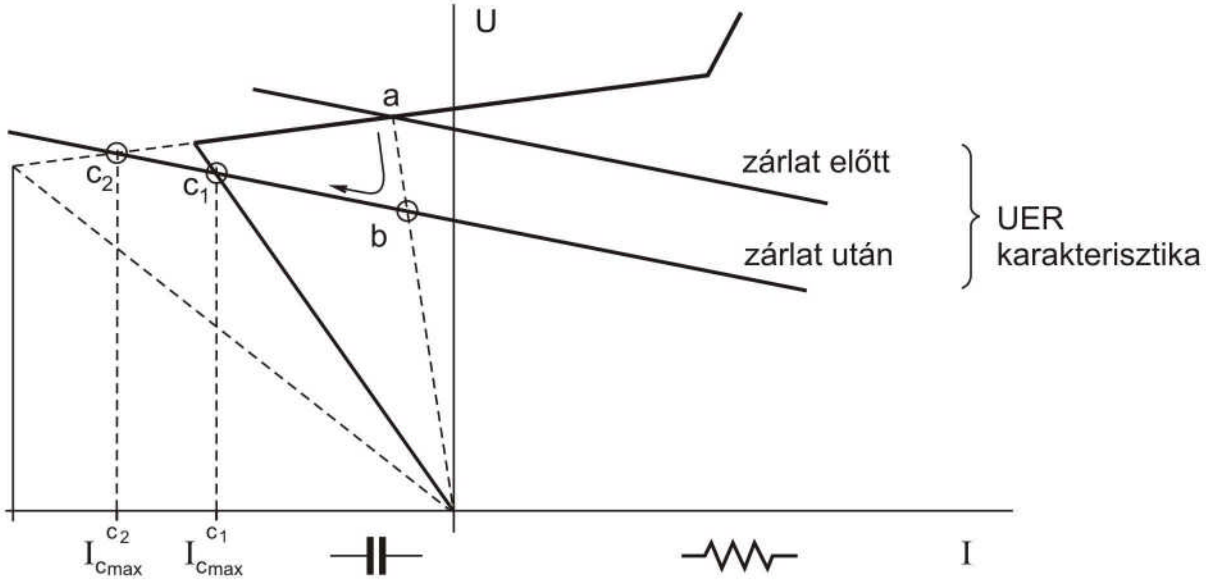
Telítődő fojtó

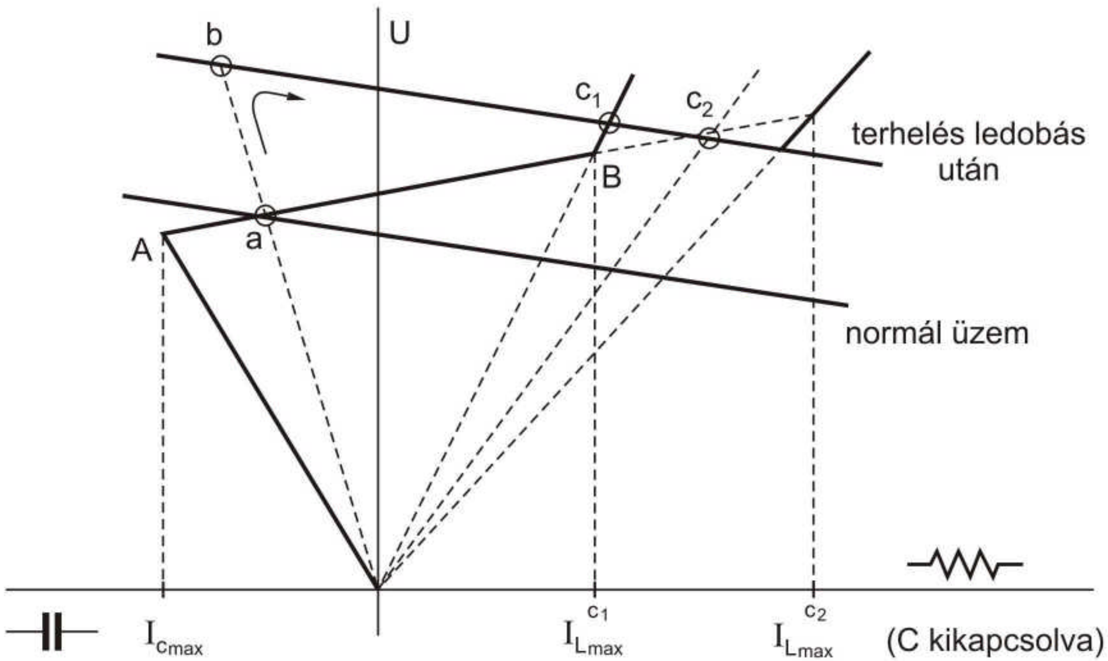
Telítődő fojtó meredekség korrekcióval



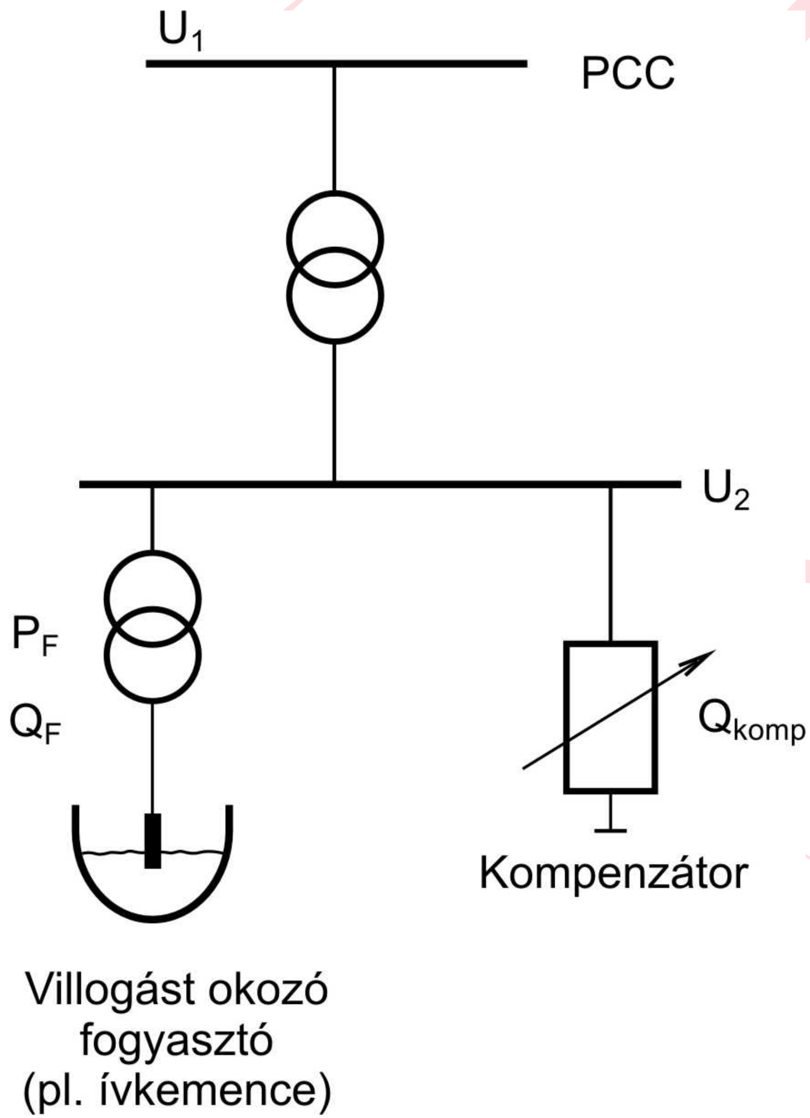


Tranziensek követése a karakterisztikákon

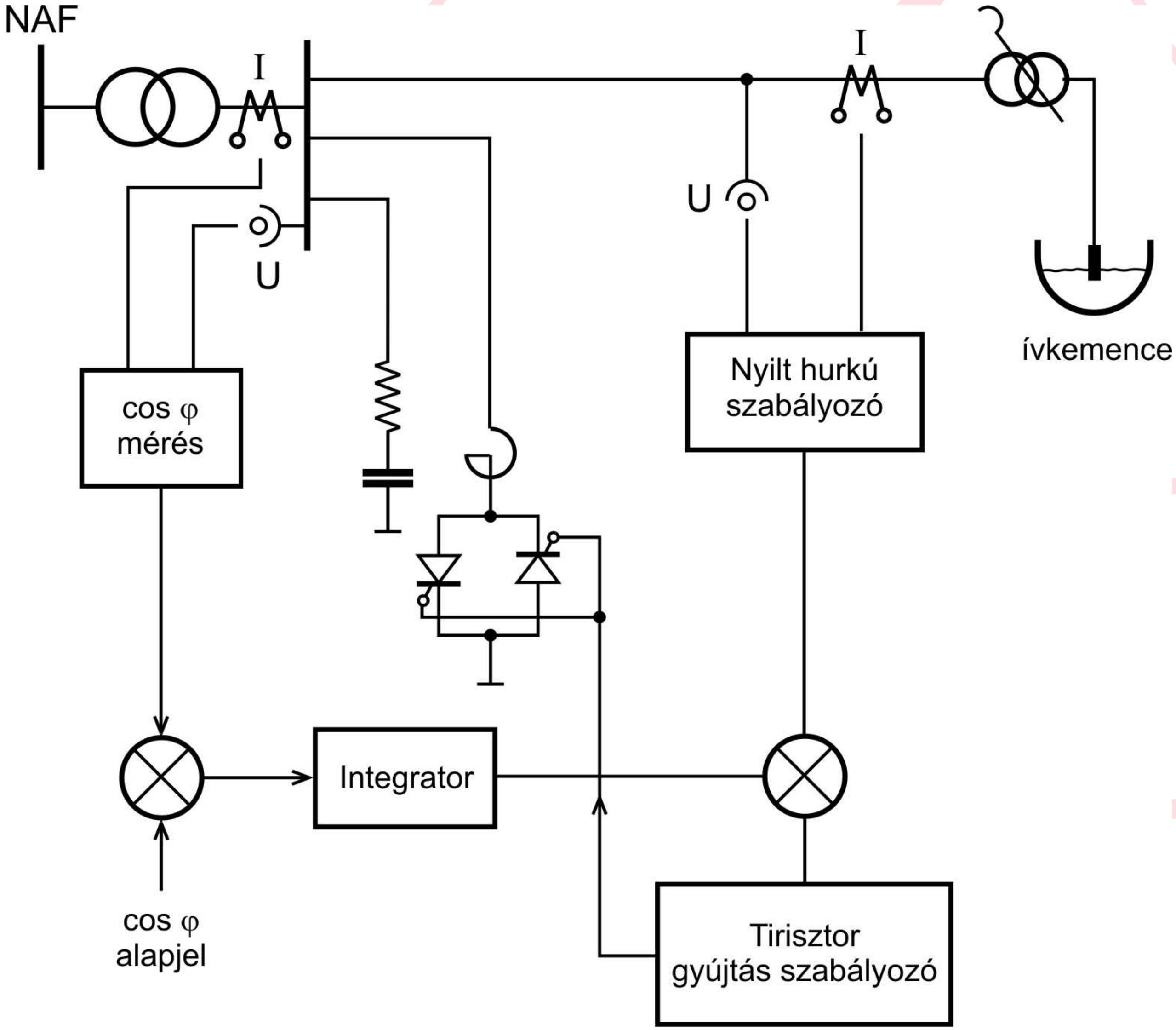




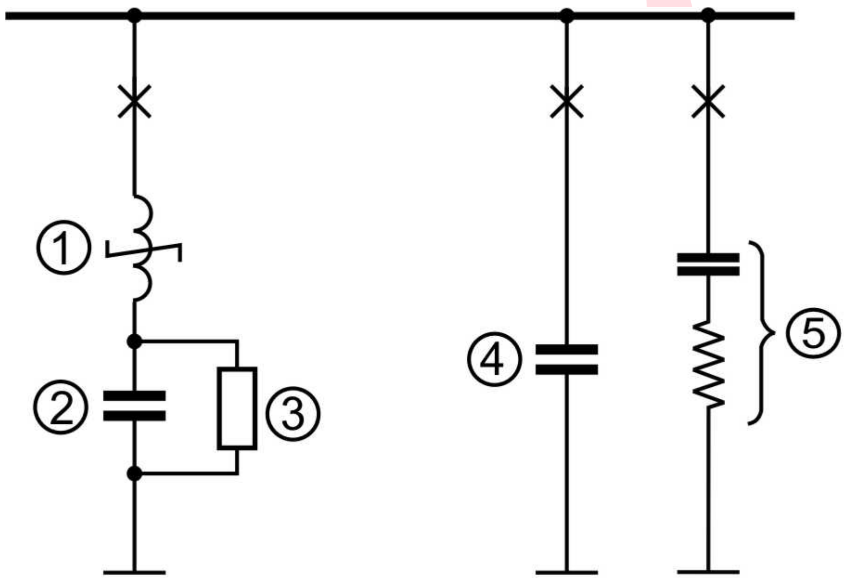
Alkalmazási területek



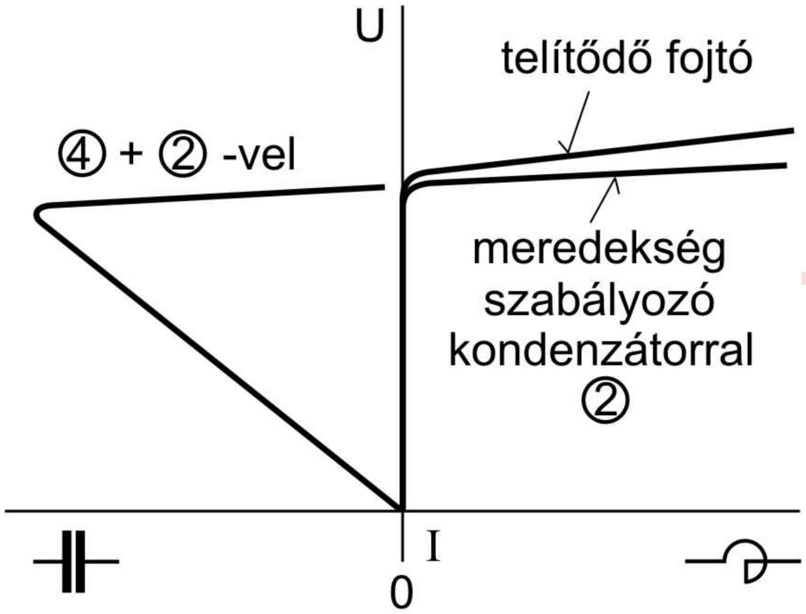
Alkalmazási területek



Telítődő fojtós kompenzátor, mint villogás kompenzátor

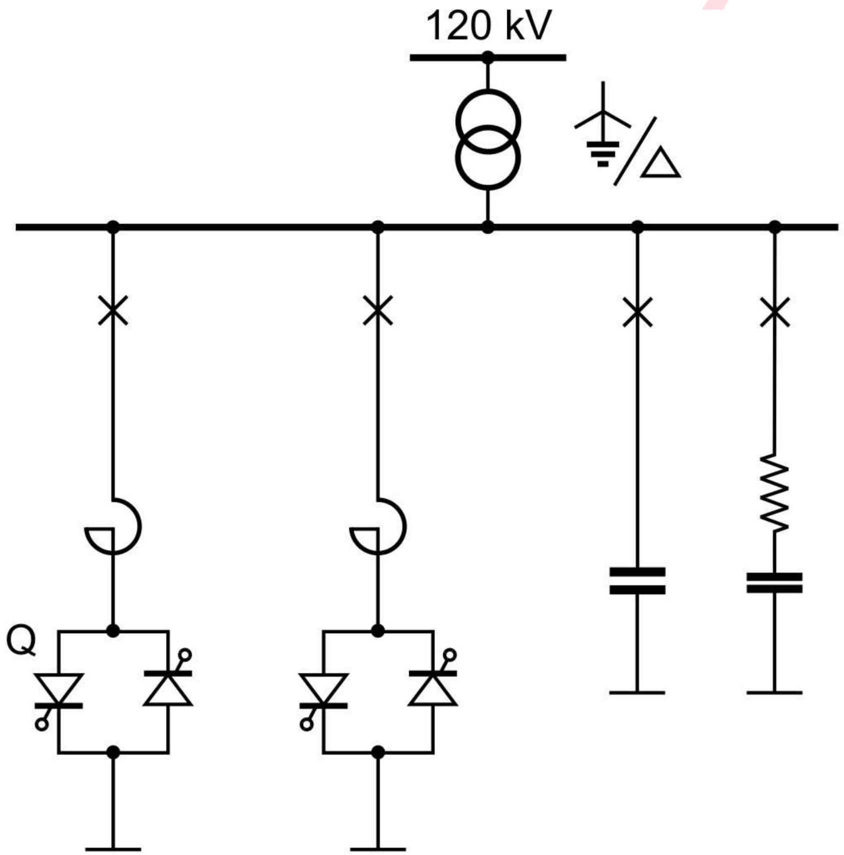


a.)

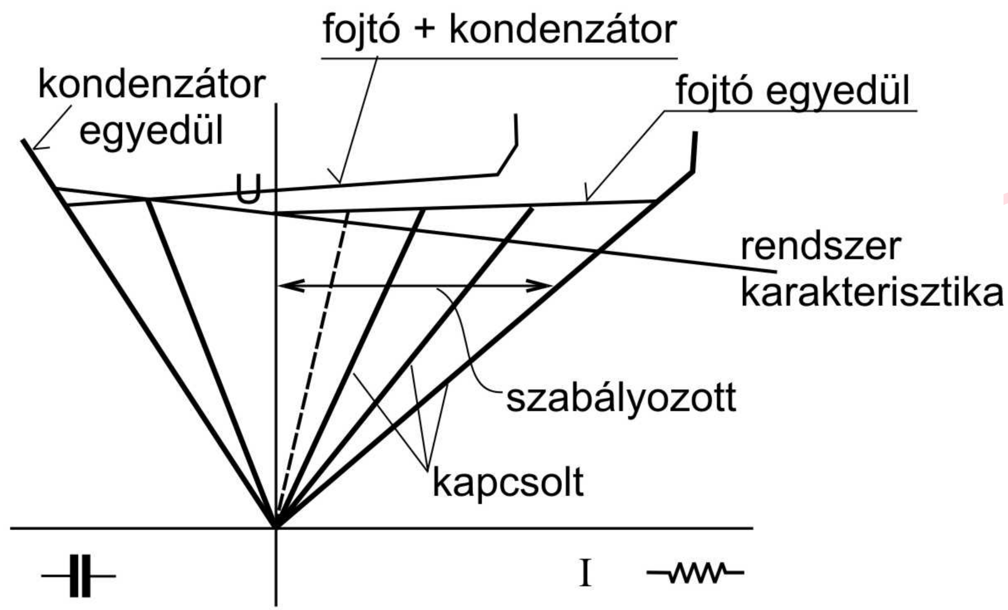


b.)

Alkalmazási megoldások

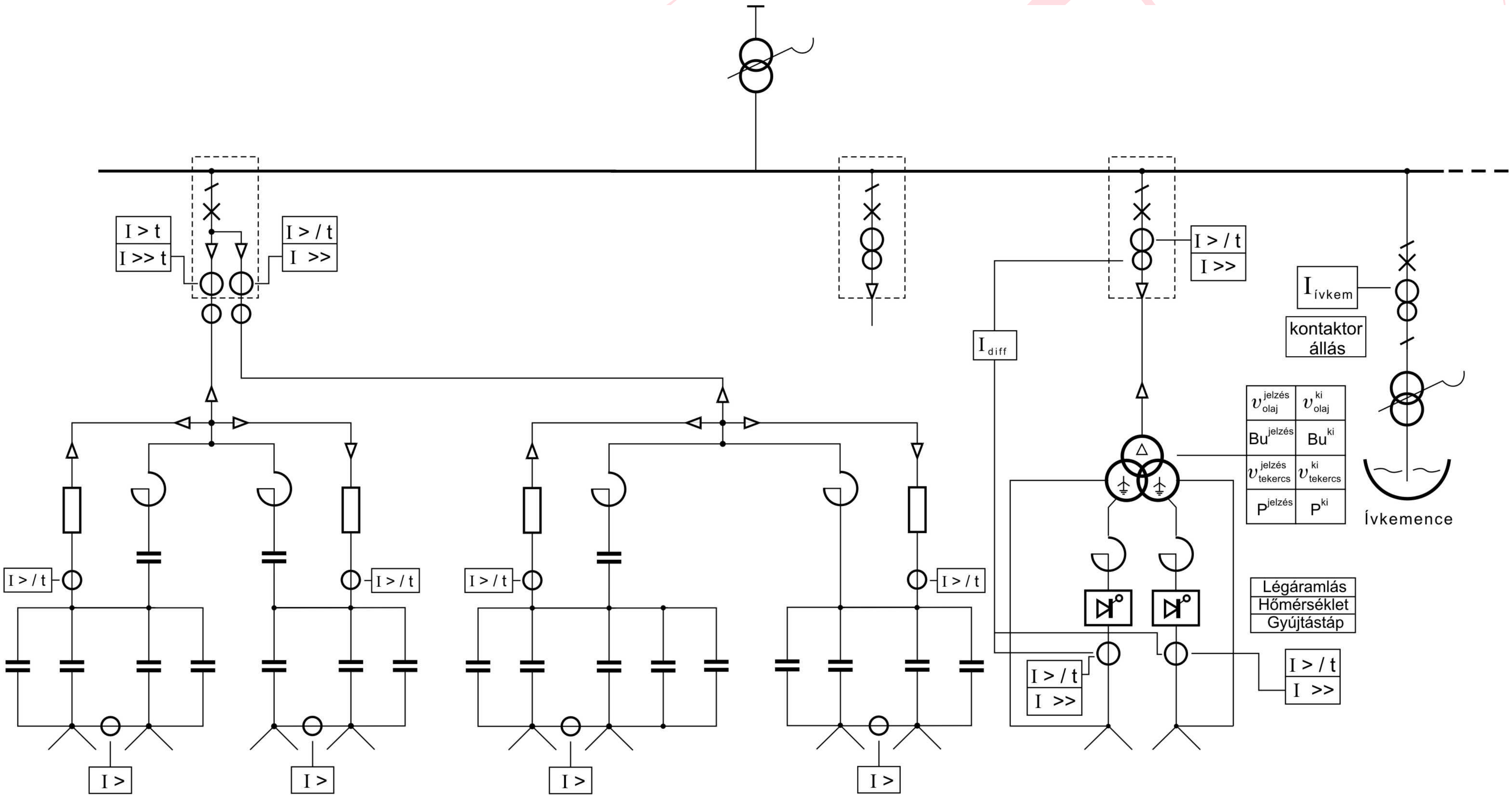


a.)

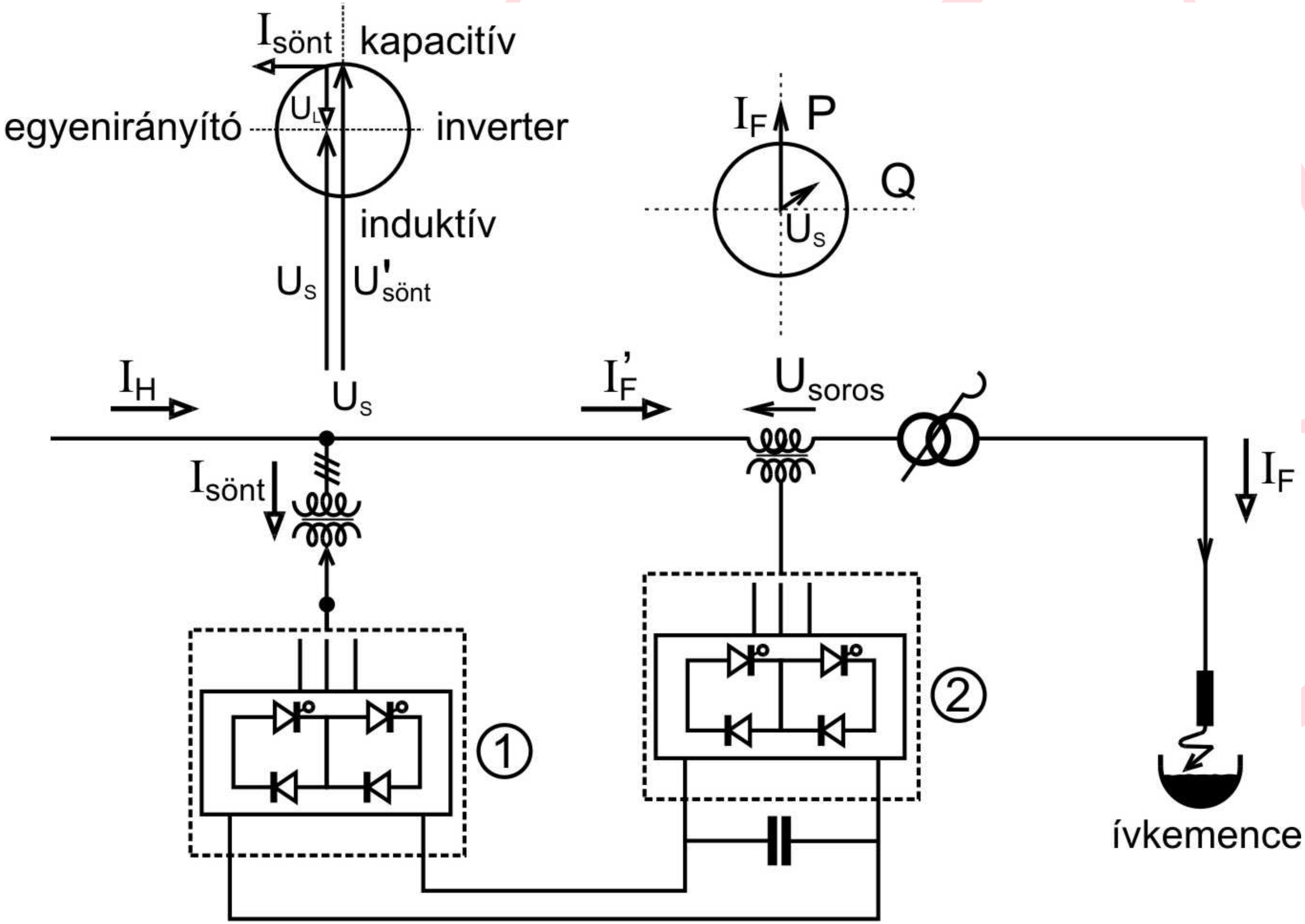


b.)

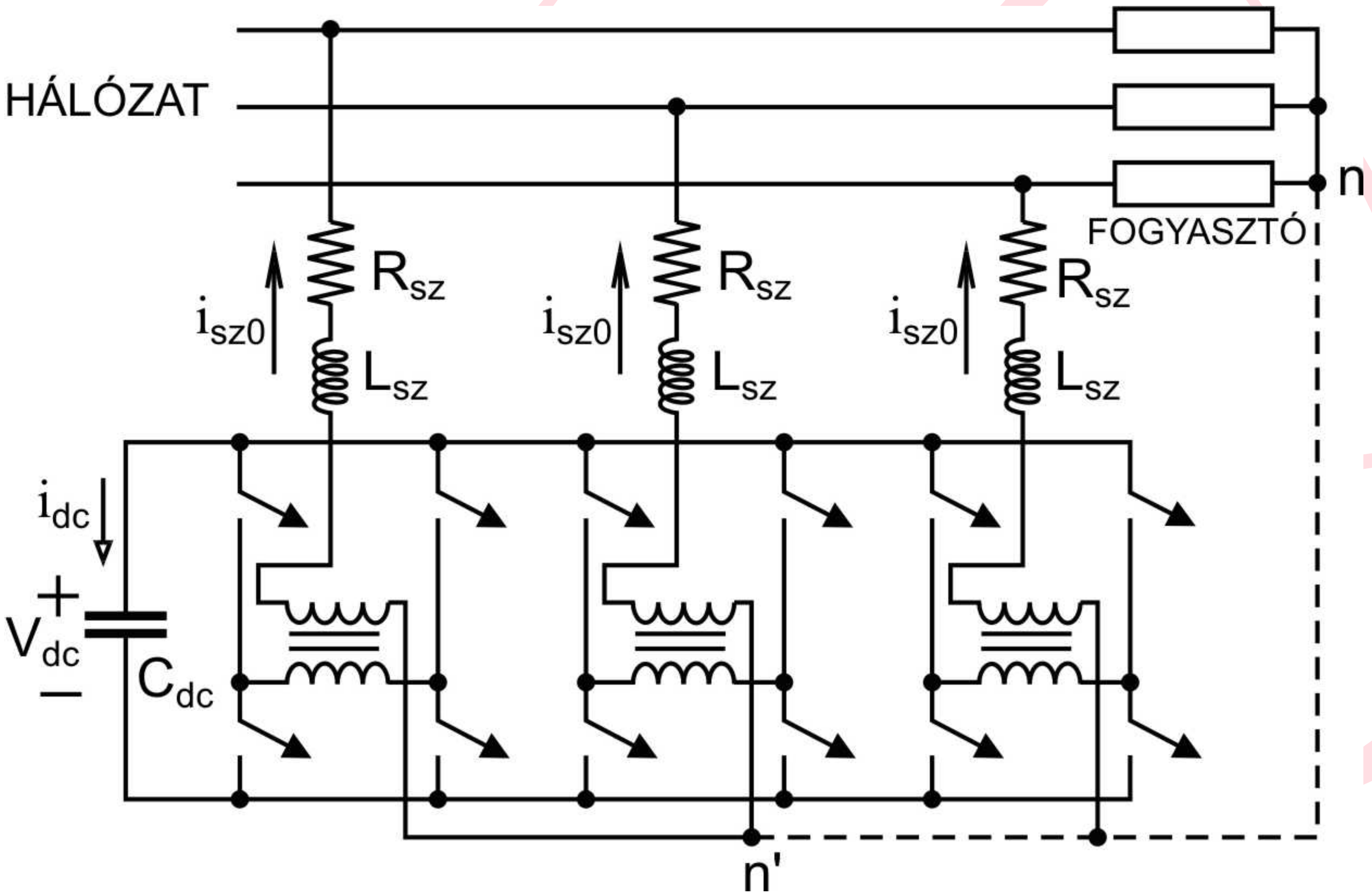
Alkalmazási területek



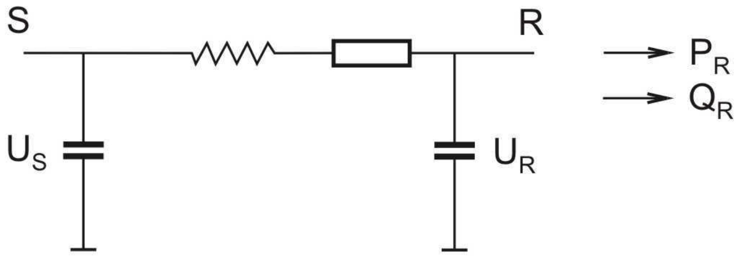
Alkalmazási területek

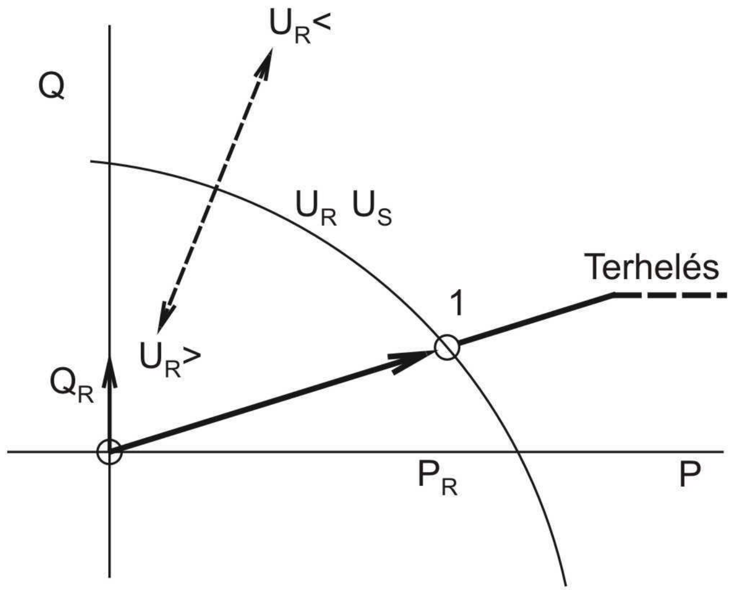


Aktív kompenzátor

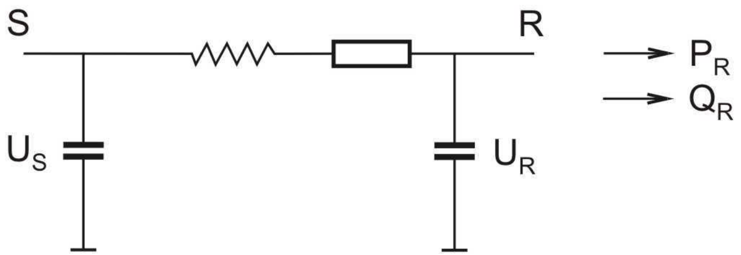


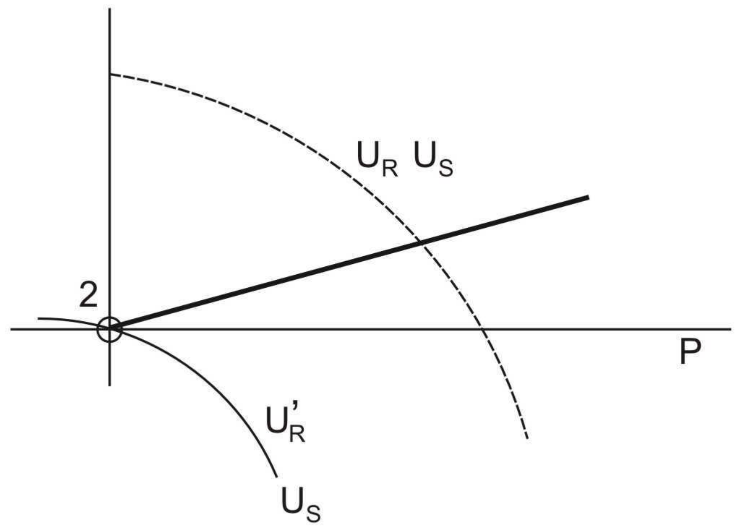
Alkalmazási területek



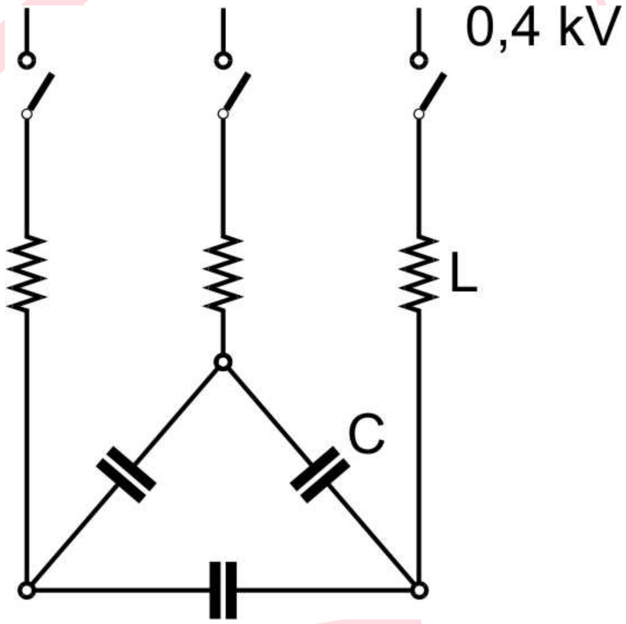


$$\frac{U_R^2 A}{B}\,\underline{/\beta-\alpha} + \frac{U_S U_R}{B}\,\underline{/\beta-\theta}$$





Kompenzálás kisfeszültségen



$$f_r^{(\text{KÖF})} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{tr} + L)C}}$$

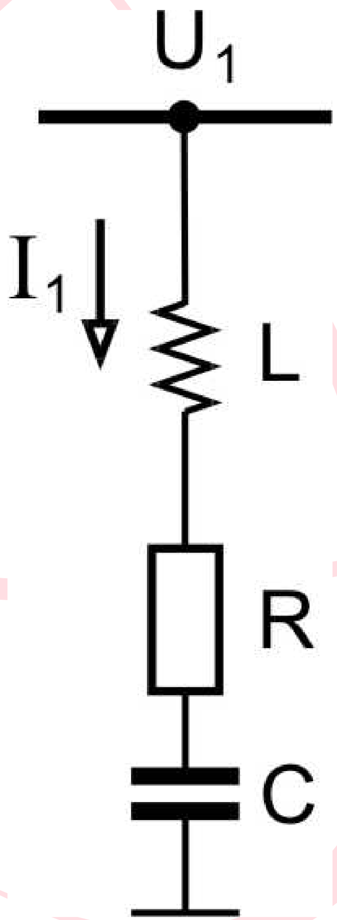
$$f^* = \frac{f_r^{(\text{KÖF})}}{f_r^{(\text{KIF})}} = \frac{2\pi\sqrt{LC}}{2\pi\sqrt{(L_{tr} + L)C}} \qquad f^* = \frac{1}{\sqrt{L_{tr}/L + 1}}$$

$$f^* = \frac{1}{\sqrt{h^2 Q_C / S_Z + 1}} \qquad Q_C/S_n = \left|\frac{1}{(f^*)^2} - 1\right| = \left|\frac{1}{1.21} - 1\right| \approx 0.1$$

- a legkisebb kapcsolt kondenzátor egység alapharmonikus meddőteljesítménye a transzformátor névleges teljesítményének 10 %-a kellene legyen

L-C elemek igénybevétele

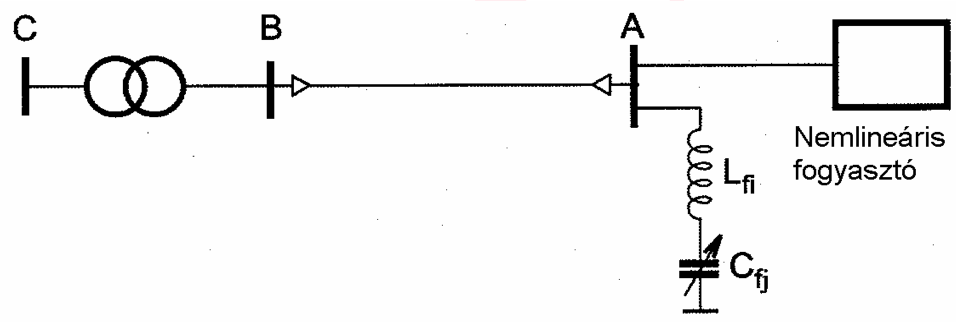
$$\frac{I_{sz1}}{I_{C1}} = \frac{U_1\omega_1 C}{U_1\omega_1 C}\,\frac{1}{\omega_1^2 LC - 1} = \frac{h^2}{h^2 - 1}$$



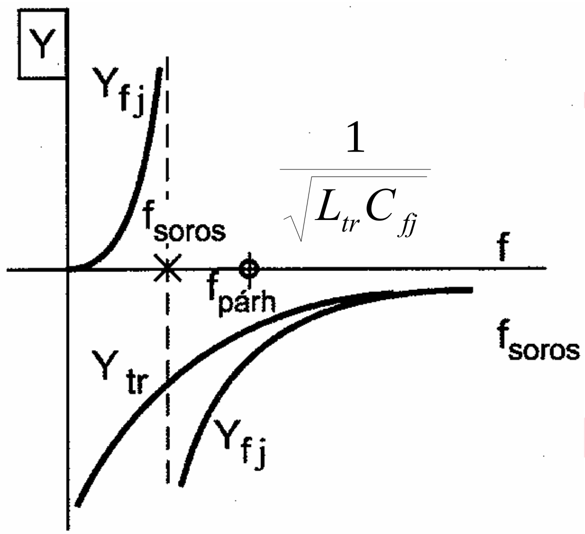
$$\frac{U_{sz1}^C}{U_{C1}} = \frac{h^2}{h^2 - 1}$$

$$\frac{Q_{sz1}^C}{Q_1^C} = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1}\right)^2$$

Előtét fojtó



$$f_{soros} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{fj}C_{fj}}}$$



Bekapcsolási áram

- bekapcsolás feszültség maximumban(α=90º)

$$U_m \sin(\omega_1 t + \alpha) = Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i dt$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega_1 t + \alpha) - h\omega_1 C\left(U_{C0} - \frac{h^2}{h^2-1}U_m \sin\alpha\right)\sinh\omega_1 t - I_m \cos\alpha \cosh\omega_1 t$$

$$i(t) = h\omega_1 C\frac{h^2}{h^2-1}U_m \sinh\omega_1 t \qquad I_m = U_m\omega_1 C\frac{h^2}{h^2-1}$$

- $i(t)_{max}/I_m=h$

HUNGARIAN COPPER PROMOTION CENTRE

www.lpqi.org