

HÁLÓZATI TRANZIENSEK

Dr. Bán Gábor egy. tan.

Bevezetés:

- A tárgykör helye a mérnöki gyakorlatban.
- Az előadások célkitűzései.
- A tantárgy főbb fejezetei.

Hálózati tranziensek csoportosítása

- **Elektromechanikus tranziensek:** azok az átmeneti folyamatok, amelyeket a villamos paraméterek mellett generátorok, turbinák forgó tömegei is befolyásolnak és amelyek meghatározók a hálózat stabilitási viszonyainak szempontjából. Viszonylag lassú tranziensek, frekvenciájuk Hz nagyságrendű.
- **Elektromágneses tranziensek:** ezekben csupán a villamos komponensek vesznek részt, tehát az ellenállás, induktivitás és a kapacitás. Frekvenciaspektrumuk számottevő része 10 MHz alatti. Az elektromágneses tranziensek csoportján belül külön szokták említeni az igen gyors tranzienseket (very fast transients – VFT), amelyek gázszigetelésű kapcsolóberendezésekben fordulnak elő és amelyeknek frekvenciaspektruma a 100 MHz nagyságrendet is eléri.
- A tranziensek fenti két típusa általában együtt keletkezik, de külön-külön tárgyalható.

A villamos energiarendszer elektromágneses tranzienseit az a körülmény teszi speciálissá, hogy a hálózat egyaránt tartalmaz koncentrált, illetve finoman elosztott paraméterű elemeket, vagyis vezetékeket. Utóbbiakban az elektromágneses tranziensek idején hullámjelenségek játszódnak le.

Az előadások célja:

- a tranziens folyamatok fizikájának megérttetése,
- kapcsolat létesítése a hálózat stacioner folyamatai és a hullámfolyamatok között, vagyis az elektrotechnikai szemlélet általánosabbá tétele,
- a tranziensek számításánál, szimulációjánál alkalmazott, fontosabb módszerek ismertetése és begyakorlása.
- A legfontosabb tranziensek hálózati szerepének és gyakorlati oldalának a megismerése. (A magyarázatok kiegészítésére, illetve az egyes módszerek bemutatására olyan példákat választottam, amelyek erre lehetőséget adnak)



"Professzorom, Orlich, igazi úriember volt, de egyáltalán nem volt tudományos fantáziája, és nem tudott valamirevaló problémát adni. Szerencsére én találtam magamnak. A villamos tranziensek nagy problémát okoztak a magasfeszültségű hálózatokban; amikor ezek regisztrálásának módszerei után kutattam, akkor találkoztam a Braun csővel és én voltam az egyike az elsőeknek, akik ezt nagy írósebességű oszcillográffá alakították, belső fényképezéssel. Én voltam az első, aki tranziens- fényképet készített."

Gábor Dénes

Tranziensek a villamosmérnöki gyakorlatban 1

Léggöri eredetű tranziensek

- Villámcsapás szabadvezetékbe, (védővezetőbe, fázisvezetőbe, oszlopba, oszlopközbe, kompakt konstrukciók, kombinált vezetékek, burkolt vezetékek)
- Szabadvezetékert villámcsapás által a szabadvezetékkel fémes kapcsolatban levő kábelben, illetve a kábelhálózatban okozott tranziens folyamatok és igénybevételek.
- Szabadvezetékert villámcsapás hatása a szabadvezetékkel transzformátoron keresztül kapcsolatban lévő kábelhálózatra.
- Közeli villámcsapás által a szabadvezetékben indukált tranziens folyamatok
- Villámcsapás által okozott tranziensek föld alatti kábelekben.

Tranziensek a villamosmérnöki gyakorlatban 2

Kapcsolási tranziensek és túligénybevételek

- Távvezetékek bekapcsolása, kikapcsolása, visszakapcsolása okozta tranziens folyamatok (EHV átviteli hálózat, megszakítók, GIS)
- Zárlat keletkezése, megszűnése által kiváltott tranziensek.
- Íves, ívelő és intermittens zárlatok által okozott tranziensek (csillagpont földelés, spontán ívkialvás, EHV egyfázisú visszakapcsolás).
- Távvezetési zárlat helyének megállapítása tranziensek alapján.
- Részkisülések elemzése kábelekben, a hibás szakasz helyének megállapítása.
- Kábeldiagnosztika polarizációs, depolarizációs, relaxációs feszültségek, áramok analízise segítségével.

Néhány gondolat a tranziensekről

- A meghibásodások, üzemzavarok jelentős része tranziensek hatására következik be.
- A meghibásodások jelentős része tranzienseket okoz.
- A tranziensek lehetnek fenyegetők, de befolyásolhatók, megszelídíthetők és nemes célokra felhasználhatók.
- Tudni kell velük bánni!
- A hálózat és komponensei tranziens folyamatok idején sokkal többet árulnak el magukról, mint stacioner folyamatok alatt. Ezért bonyolultabbak a stacioner folyamatoknál, de szórakoztatóbbak.
- Tranziens folyamatok, állapotok a természettudományok minden ágában előfordulnak és általában jelentős szerepet játszanak.
- Az egyes szaktudományokban lezajló tranziens folyamatok között szoros analógia áll fenn.
- Annak számára, aki megérti ezeket a jelenségeket, és érzéket is ki tud fejleszteni magában a tranziens folyamatok iránt, a természet egyszerűbbé, áttekinthetőbbé és érthetőbbé válik.

A tananyag fő fejezetei

1. Hullámfizika: hosszú vezetékeket és koncentrált-nak tekinthető komponenseket tartalmazó hálózatokon lezajló tranziensek.

2. Tekercselések tranziensei: olyan folyamatok, amelyekben finoman elosztott paraméterű, de nem vezeték-jellegű elemek vesznek részt.

3. A hálózati csillagpont kezelése: háromfázisú hálózatokban lezajló tranziensek, amelyeknek fontos szerepe van a csillagpontföldelés módjának megválasztásánál. E folyamatok tárgyalásánál általában nem szükséges a vezetékeket finoman elosztott paraméterű rendszernek tekinteni.

Egyvezetős, veszteségmentes vezetékeken lejátszódó hullámfolyamatok

1. Alapösszefüggések (a távíró egyenletekből) :

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -L' \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = L' C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

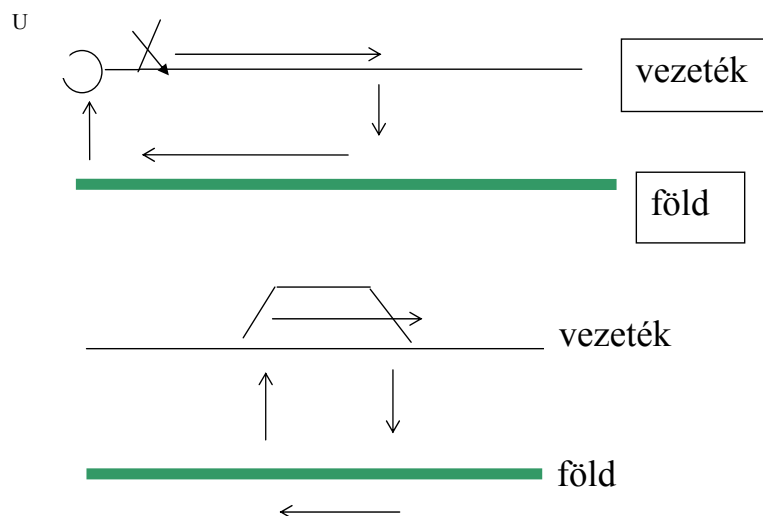
$$\frac{\partial i}{\partial y} = -C' \frac{\partial u}{\partial t}$$

Feltételezés: $u = f_u(t - y/v)$ és $i = f_i(t - y/v)$

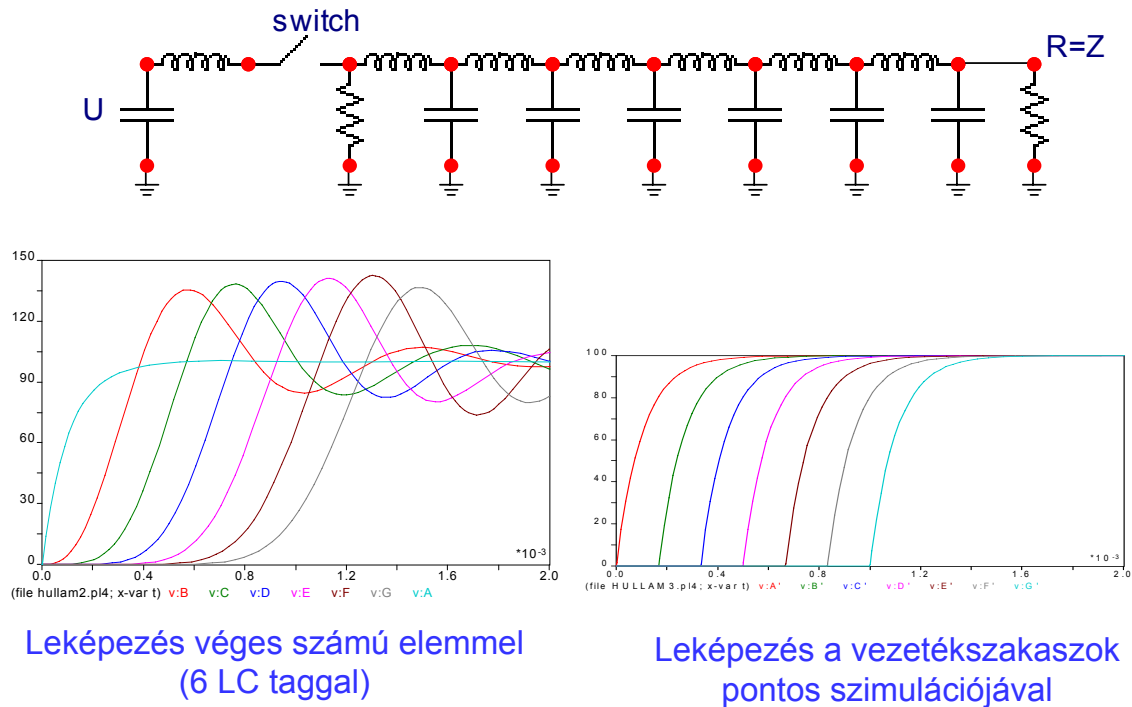
A feltételezett megoldási formát a távíró egyenletekbe helyettesítve, a következő alakú eredmény adódik:

$$u = F_1(t - y/v) + F_2(t + y/v) \quad i = [F_1(t - y/v) - F_2(t + y/v)]/Z$$

A hullámterjedés fizikája 1.



A hullámterjedés fizikája 2.



A hullámterjedés alapvető összefüggései

Kiindulási egyenletek:

$$\underline{u} = d\Psi/dt = iL'vdt/dt = \underline{iL}'v \text{ és } \underline{i} = dQ/dt = uC'vdt/dt = \underline{uC}'v$$

Eredmények:

$$v = \pm 1/\sqrt{L'C'}$$

$$T' = 1/v = \sqrt{L'C'}$$

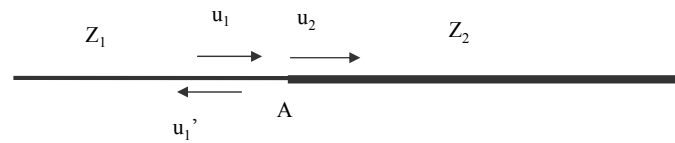
$$T_{vez} = \sqrt{LC}$$

$$Z = \sqrt{L/C}$$

$$ZT_{vez} = L_{vez}$$

$$T_{vez}/Z = C_{vez}$$

Hullámreflexió és –áthatolás diszkontinuitási ponton



Az áthatoló, illetve visszavert feszültség-, valamint áramhullámok meghatározása érdekében az alábbi egyenleteket lehet felírni:

$$u_1 = i_1 Z_1; \quad u_2 = i_2 Z_2; \quad u_1' = -i_1' Z_1; \quad u_1 + u_1' = u_2; \quad i_1 + i_1' = i_2$$

Fenti egyenletekből:

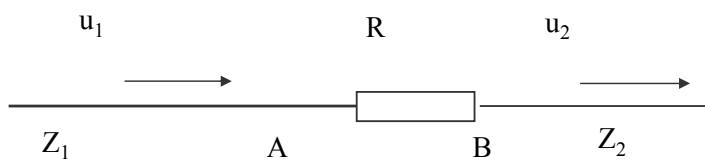
$$u_2 = u_1 \cdot 2Z_2 / (Z_1 + Z_2) = \beta_u u_1$$

$$u_1' = u_1 \cdot (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) = \rho_u u_1$$

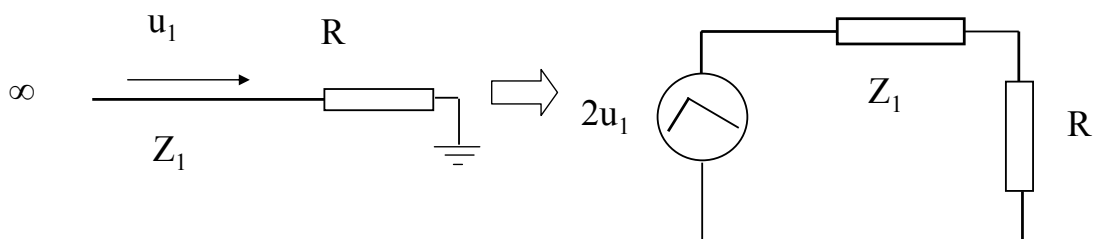
$$i_2 = i_1 \cdot 2Z_1 / (Z_1 + Z_2) = \beta_i i_1$$

$$i_1' = i_1 \cdot (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2) = \rho_i i_1$$

Gyakorlati alkalmazások



$$u_2 = u_1 2Z_2 / (Z_1 + R + Z_2)$$



Sorozatos hullámreflexiók számítása

A villamosenergia hálózat számos diszkontinuitási pontot tartalmaz. A hálózati tranziensek a sorozatos reflexiók során létrejött elemi hullámok szuperpozíciói. A reflexiók nagy száma miatt az eredő feszültség- és áramgörbék meghatározására speciális eljárások szolgálnak.

- Bergeron eljárás,
- Bewley módszer (menetdiagram),
- egyenértékű hullám módszere,
- referencia áramkörök alkalmazása,
- tranziens hálózati analízátor (TNA- transient network analyzer)
- EMTP (electromagnetic transient program)

Bergeron-eljárás 1.

$$u = F_1(t-y/v) + F_2(t+y/v)$$

$$i = [F_1(t-y/v) - F_2(t+y/v)] / Z$$

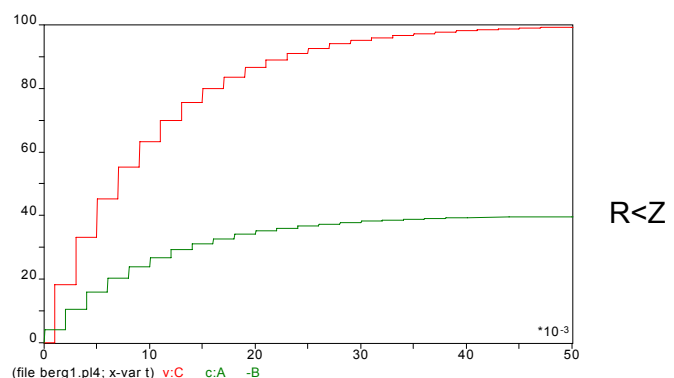
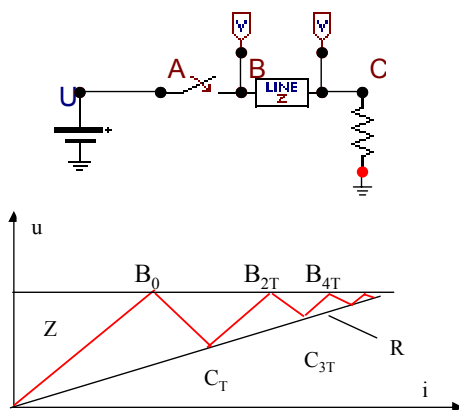
$$iZ = F_1(t-y/v) - F_2(t+y/v)$$

$$u + iZ = 2F_1(t-y/v)$$

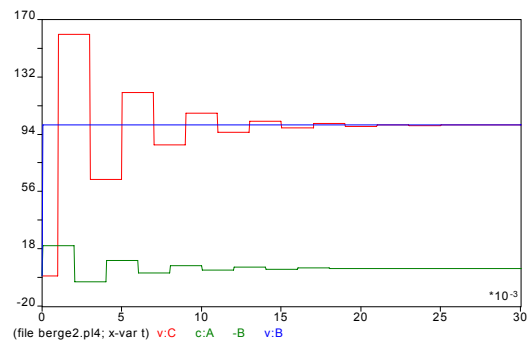
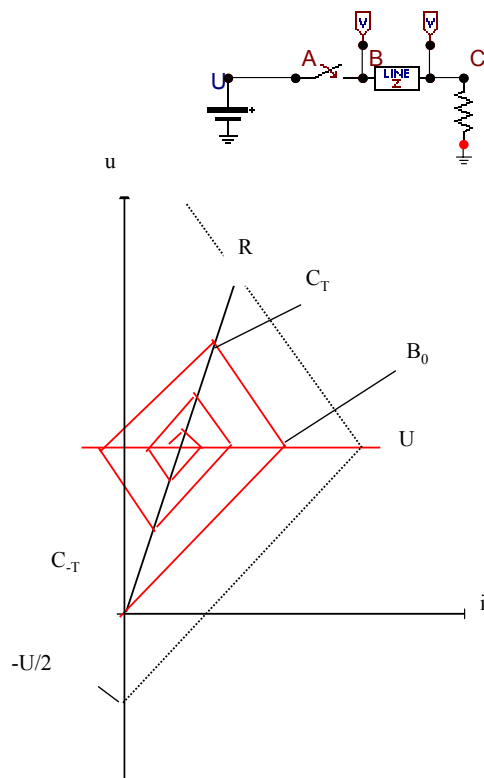
$$u - iZ = 2F_2(t+y/v)$$

$$u + iZ = 2F_1(0) = A = \text{const.}; \quad u = A - iZ$$

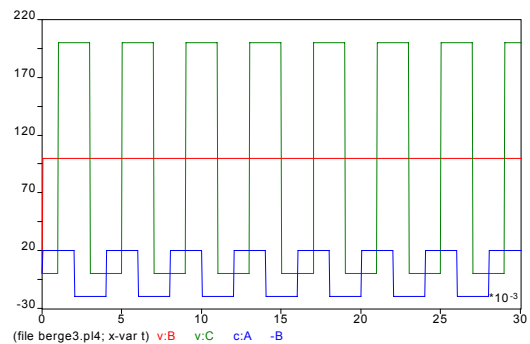
$$u - iZ = 2F_2(0) = B = \text{const.}; \quad u = B + iZ$$



Bergeron- eljárás 2.



$R > Z$

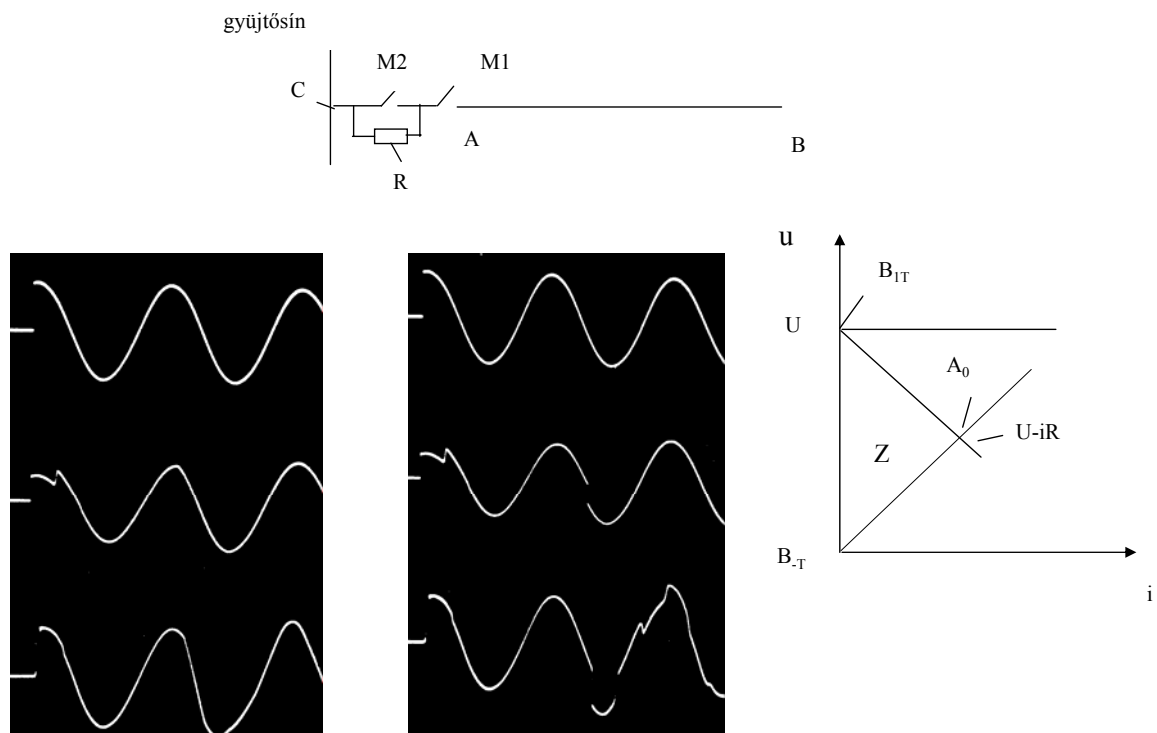


$R = \infty$

Példa: vezeték be- és visszakapcsolása

- Az a körülmény, hogy a kikapcsolás nem azonos pillanatban történik a vezeték két végpontján, visszamaradt töltést (trapped charge) okoz a vezetéken.
- Az önműködő visszakapcsolás rövid holtideje alatt az ép fázis(ok)on visszamaradt feszültség lecsökkenése jelentős, ha a vezetéken induktív feszültségváltók vannak felszerelve.
- Kapacitív feszültségváltóknak nincs ilyen hatásuk.
- A be- és visszakapcsolási túlfeszültség mérsékelésére széleskörűen alkalmazták az igen nagy (400 kV és efeletti) feszültségű vezetékek kapcsolására ellenállásos megszakítókat.

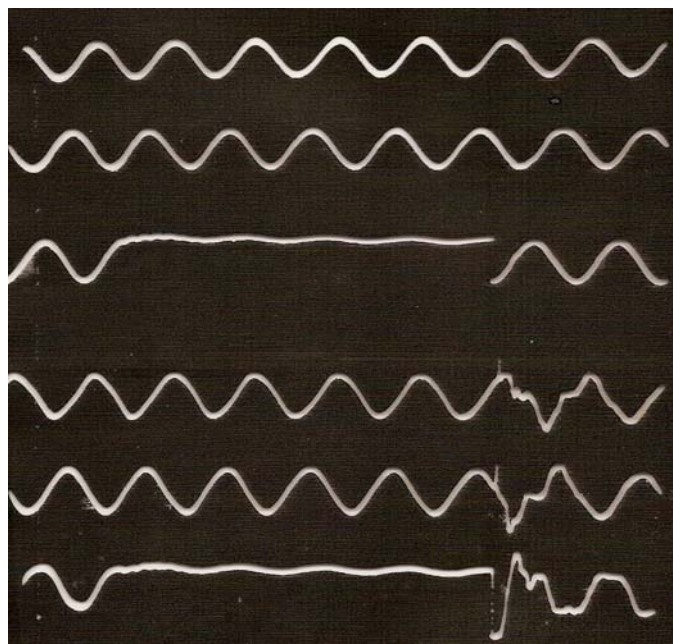
Bekapcsoláskor ellenállásos megszakító



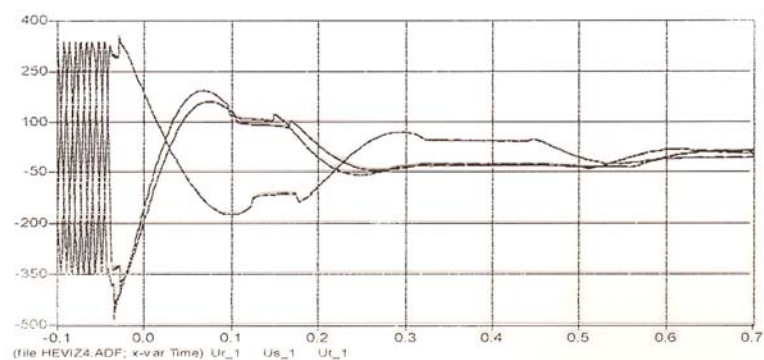
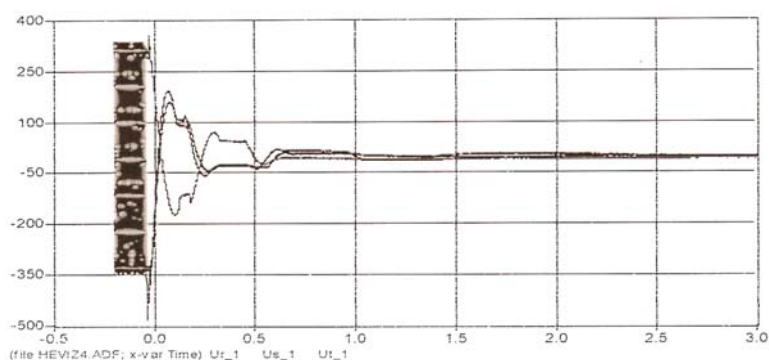
A bekapcsolási tranziens túlfeszültség-maximuma

- A legnagyobb feszültség mindig a nyitott vezetékvégen keletkezik.
- 2 p.u.-t meghaladhatja a túlfeszültség maximuma, ha automatikus visszakapcsolásnál a visszamaradó feszültség és a tápoldali gyűjtősín feszültségének a visszakapcsolás pillanatában fennálló polaritása ellentétes.
- Növelheti a visszakapcsolási túlfeszültséget a távvezetékbe iktatott soros kondenzátoron visszamaradó túlfeszültség (hosszú vezeték, ill. FACTS).
- Növelheti a visszakapcsolási túlfeszültséget a vonali megszakító visszagyújtása kikapcsolásnál (kapacitív áram megszakítása!)
- Növelheti a visszakapcsolási túlfeszültséget a söntkompenzálás, mert az ép fázis(ok)ban visszamaradt töltésnek a söntfojtókon keresztüli kisülése oszcilláló, nagy amplitudójú visszamaradó feszültséget eredményez.

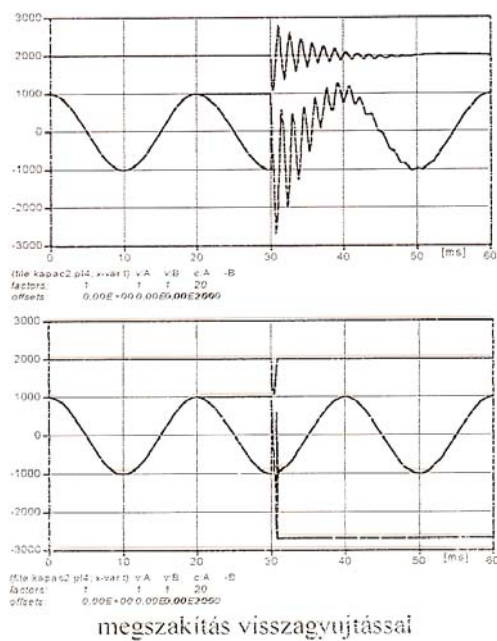
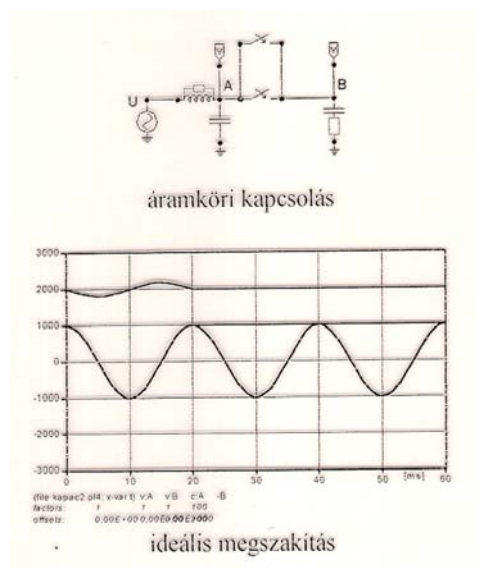
Téves (zárlat nélküli) egyfázisú visszakapcsolás



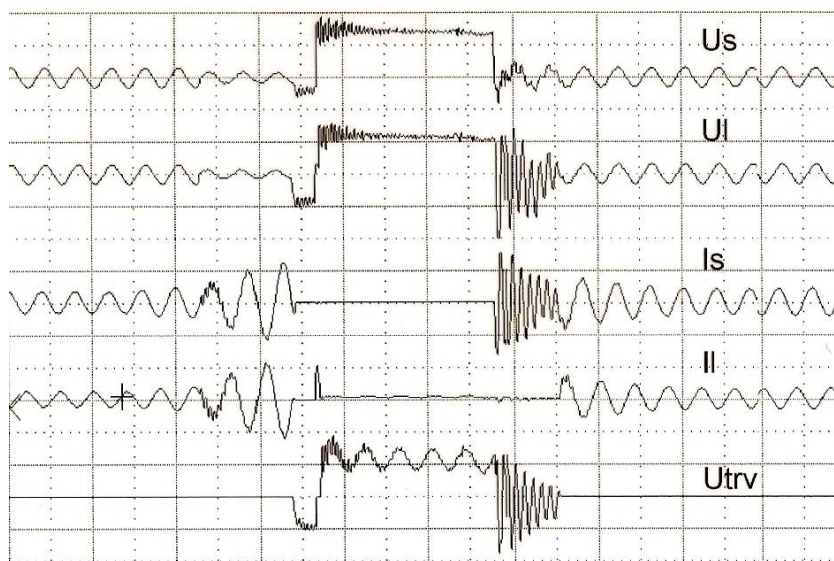
400 kV-os szabadvezeték kikapcsolása (a trapped charge kisülése a feszültségváltókon keresztül)



Kapacitív áram megszakítása



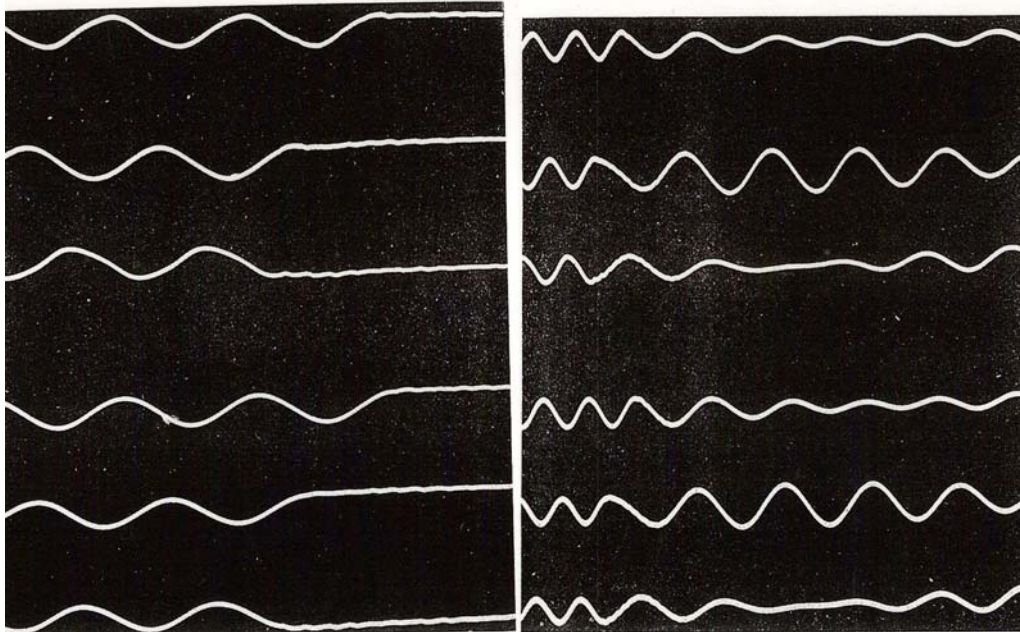
Trapped charge (FACTS)



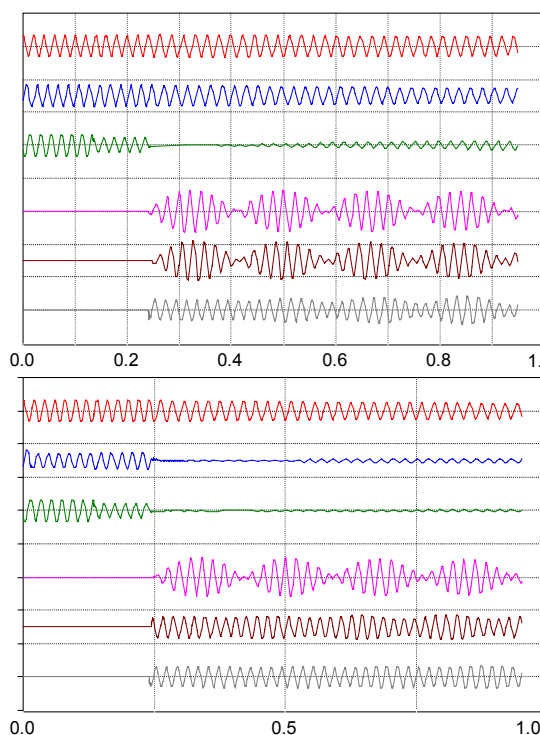
Phase-to-phase internal fault, three-phase reclosing

Távvezeték háromfázisú kikapcsolása

(söntkompenzálás nélkül, illetve söntkompenzációval)



Háromfázisú kikapcsolás söntkompenzált hálózaton



- felső görbék: fázisfeszültségek
- alsó görbék: a nyitott megszakító kontaktusai között mérhető feszültségek

A visszakapcsolási túlfeszültség jelentősége

- Veszélyezteti a visszakapcsolás sikerességét.
- Zárlatra való visszakapcsolás a távvezeték tartós kiesését eredményezheti.

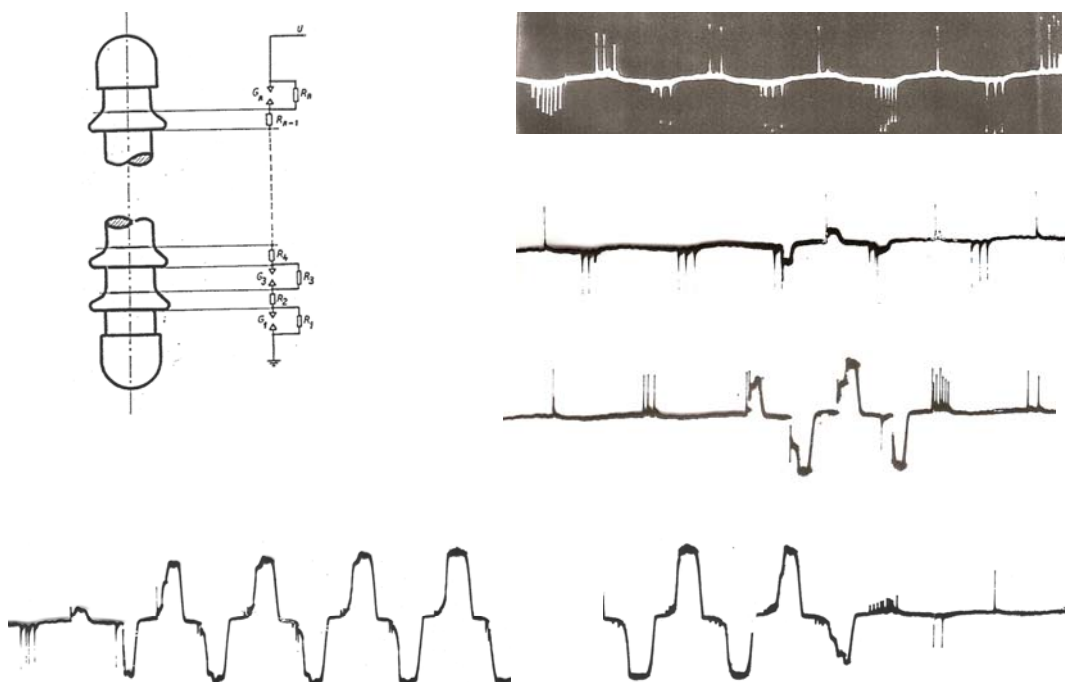
A visszakapcsolás sikerességét elősegítő eszközök, illetve módszerek:

- A visszakapcsolási túlfeszültség korlátozásának univerzális eszközei a túlfeszültségkorlátozók.
- Ellenállásos megszakítók használata a távvezetéken.
- Vezérelt visszakapcsolás (point-on-wave reclosing, polarity reclosing)

Mikor ajánlatos túlfeszültségkorlátozók mellett más módszereket is alkalmazni?

- Ha fokozott biztonságra törekszünk (pl. az átviteli hálózat távvezetékeinél).
- Ha a távvezeték szennyezett atmoszférájú zónákon halad keresztül (ilyenkor még az üzemi feszültség is sok!).

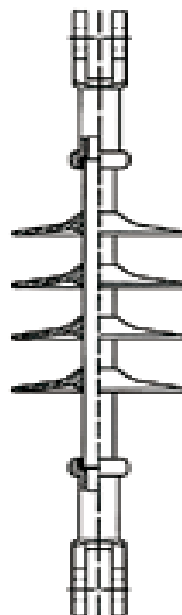
SZIGETELŐK SZENNYEZÉS MIATTI ÁTÍVELÉSE1.



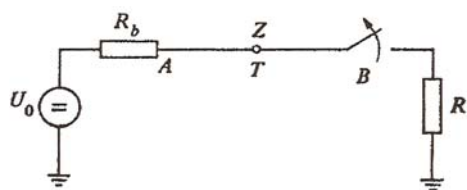
SZIGETELŐK SZENNYEZÉS MIATTI ÁTÍVELÉSE 2.

- Sok szigetelő lehet az átíveléshez közeli állapotban.
- Az átívelés üzemi feszültségen is bekövetkezhet.
- Szennyezésállósági próba rejtelmei
- Szilikon-házas kompozit szigetelők

Kompozit szigetelő szerkezete



Bergeron-eljárás 3: terhelés-ledobás



Ha R_b , vagy R , vagy mindkét ellenállás nagyságát csökkentjük, a legnagyobb túlfeszültség nő.

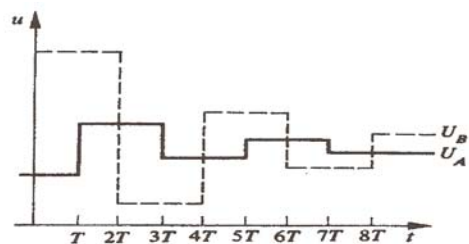
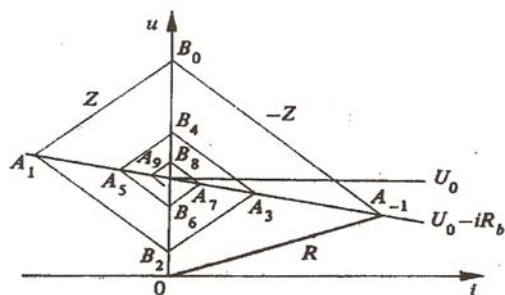
MIÉRT?

Ha $R=Z$, a legnagyobb túlfeszültség B pontban a kikapcsolás előtt mérhető feszültség kétszerese lesz.

MIÉRT?

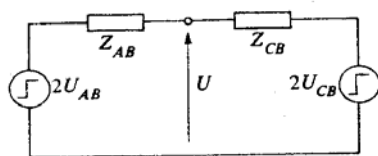
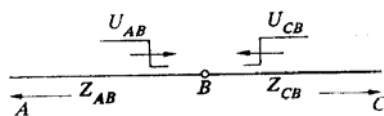
Ha emellett $R_b=0$, akkor a legnagyobb túlfeszültség a tápfeszültség kétszerese lesz.

MIÉRT?



Ha a vezeték hullámellenállását növeljük, a legnagyobb túlfeszültség is nő. **MIÉRT?**

A Bergeron-eljárás származtatása helyettesítő generátorokkal



$$u = 2U_{AB} - iZ_{AB}, \quad u = 2U_{CB} + iZ_{CB}.$$

A két csatlakozó vezetéken érkező u_{AB} és u_{CB} hullámok nagyságát A és C pontok előzményállapotaiból határozhatjuk meg.

$$U_A = u_{A+} + u_{A-}, \quad I_A = i_{A+} + i_{A-} = (u_{A+} - u_{A-})/Z_{AB}$$

Ebből a B pont felé haladó hullám:

$$u_{A+} = (U_A + I_A Z_{AB})/2$$

Eszerint a Thevenin generátorba építendő két hullám nagysága:

$$U_{AB} = 1/2[U_A(t - T_{AB}) + I_A(t - T_{AB})Z_{AB}]$$

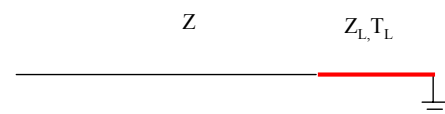
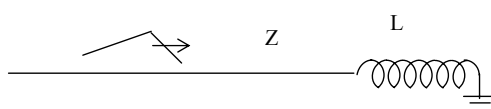
$$U_{CB} = 1/2[U_C(t - T_{CB}) - I_C(t - T_{CB})Z_{CB}]$$

Kondenzátort és tekercset (koncentrált kapacitást és induktivitást) tartalmazó hálózat számítása Bergeron eljárással

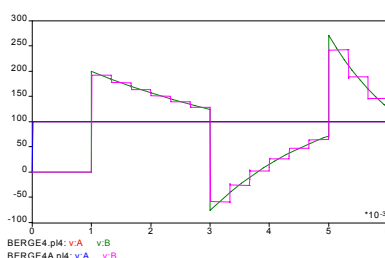
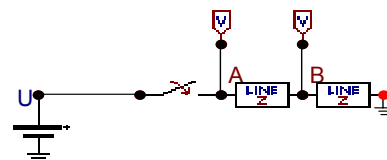
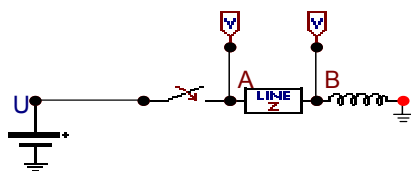
Az ilyen hálózatoknak Bergeron-eljárással való kezelése azért jelent problémát, mert ekkor az áram és a feszültség között az összefüggés nem lineáris, hanem differenciálegyenlet kapcsolja őket össze.

A bergeroni elmélet az ilyen esetekre az $u=f(i)$, illetve az $i=f(u)$ differenciálegyenleteknek differenciaegyenletekké való átalakítását, vagyis a szakaszonkénti linearizálás módszerét ajánlja. Ez azonban a szerkesztést igen bonyolulttá teszi.

Koncentrált kapacitás, illetve induktivitás vezetékké alakítása



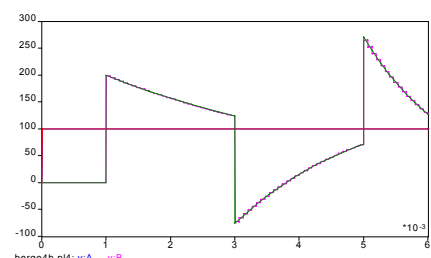
Példa: a vezeték hullámellenállása $Z=500$ ohm, hossza 300 km. A söntfőző induktivitása 1.67 H.



BERGE4.pl4: vA vB
BERGE4A.pl4: vA vB

← $Z_{L1}=10000$ ohm; $l_1=50$ km

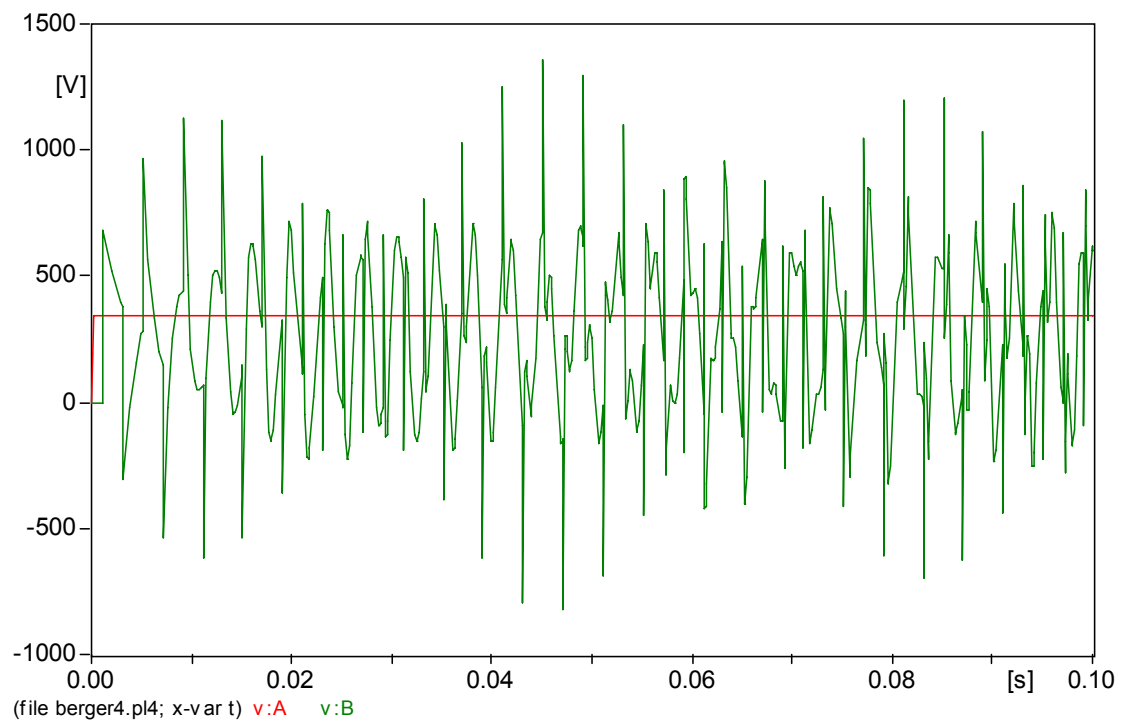
$Z_{L2}=50000$ ohm; $l_2=10$ km →



berge4b.pl4: vA vB
BERGE4A.pl4: vA vB

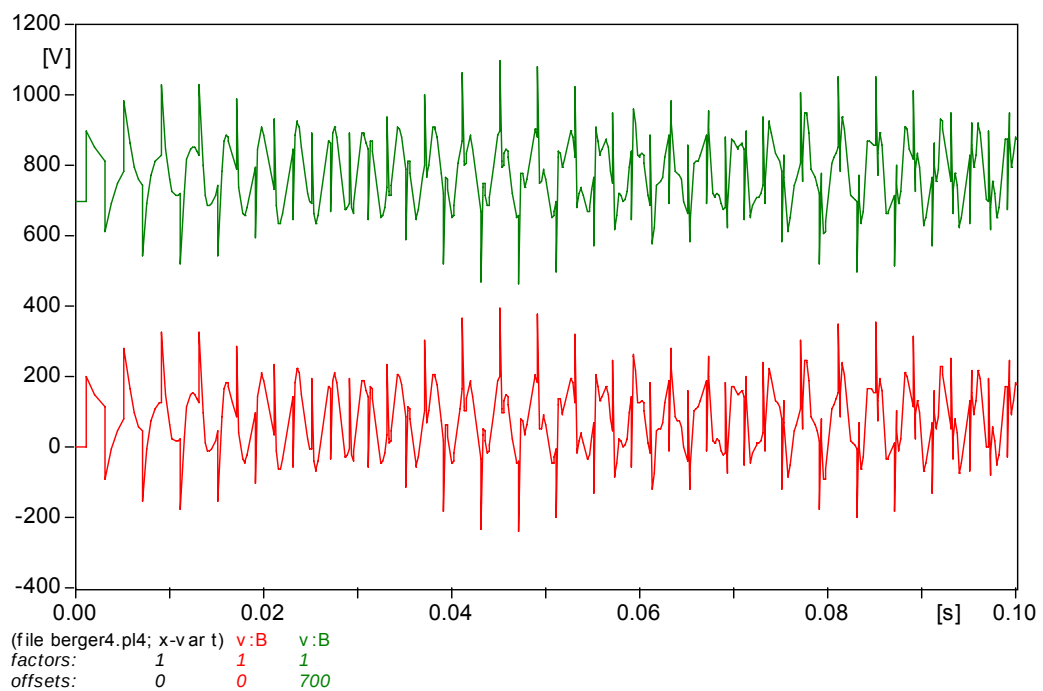
A teljes tranziens 1.

(feszültség B pontban)

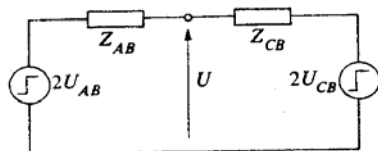
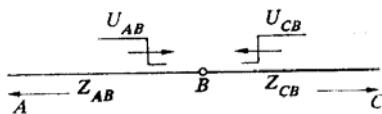


A teljes tranziens 2.

(L illetve ekvivalens vezeték)



A Bergeron-eljárás származtatása helyettesítő generátorokkal



$$u = 2U_{AB} - iZ_{AB}, \quad u = 2U_{CB} + iZ_{CB}.$$

A két csatlakozó vezetéken érkező u_{AB} és u_{CB} hullámok nagyságát A és C pontok előzményállapotaiból határozhatjuk meg.

$$U_A = u_{A+} + u_{A-}, \quad I_A = i_{A+} + i_{A-} = (u_{A+} - u_{A-})/Z_{AB}$$

Ebből a B pont felé haladó hullám:

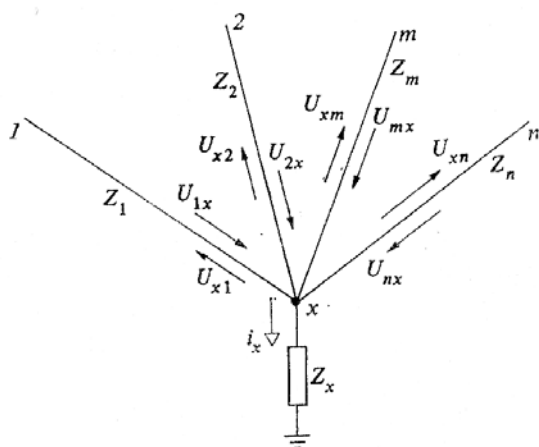
$$u_{A+} = (U_A + I_A Z_{AB})/2$$

Eszerint a Thevenin generátorba építendő két hullám nagysága:

$$U_{AB} = 1/2[U_A(t - T_{AB}) + I_A(t - T_{AB})Z_{AB}]$$

$$U_{CB} = 1/2[U_C(t - T_{CB}) - I_C(t - T_{CB})Z_{CB}]$$

Egyenértékű hullámok módszere (Kostenko)



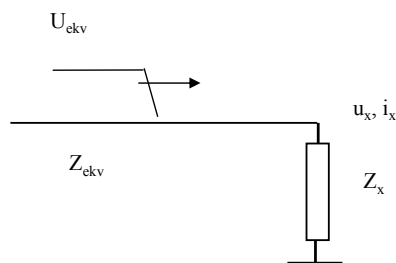
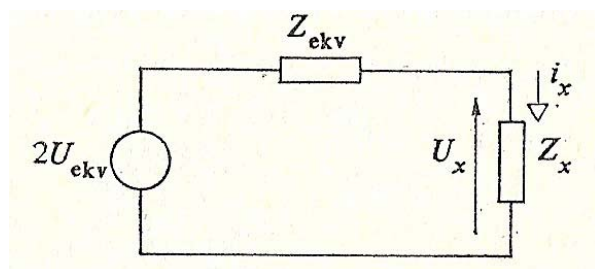
A csomópont feszültsége:

$$u_x = u_{1x} + u_{x1} = u_{2x} + u_{x2} = u_{mx} + u_{xm}.$$

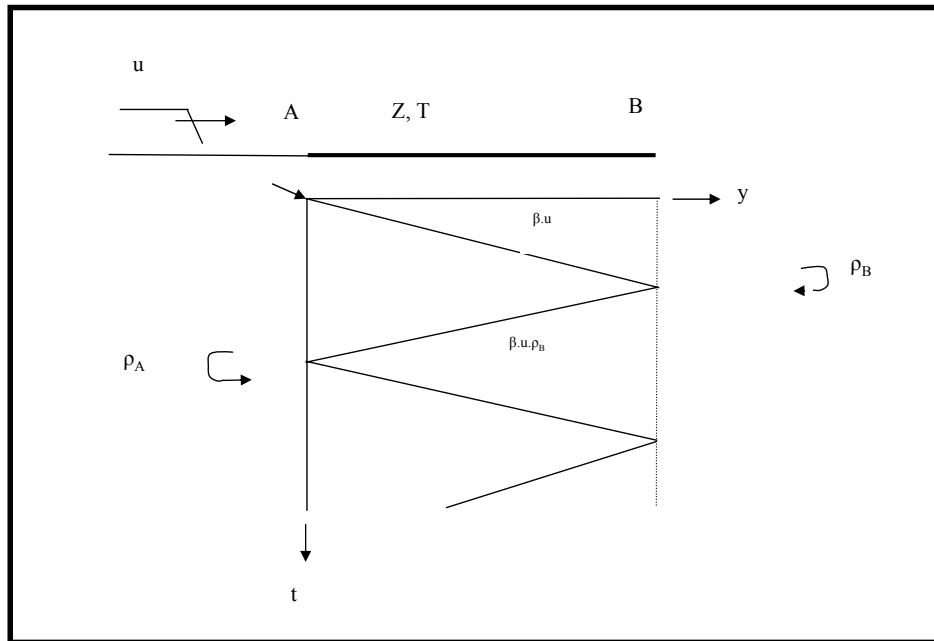
A csomópont árama, vagyis a Z_x impedancián átfolyó áram:

$$i_x = \sum_{m=1}^n \left(\frac{u_{mx}}{Z_m} - \frac{U_{xm}}{Z_m} \right).$$

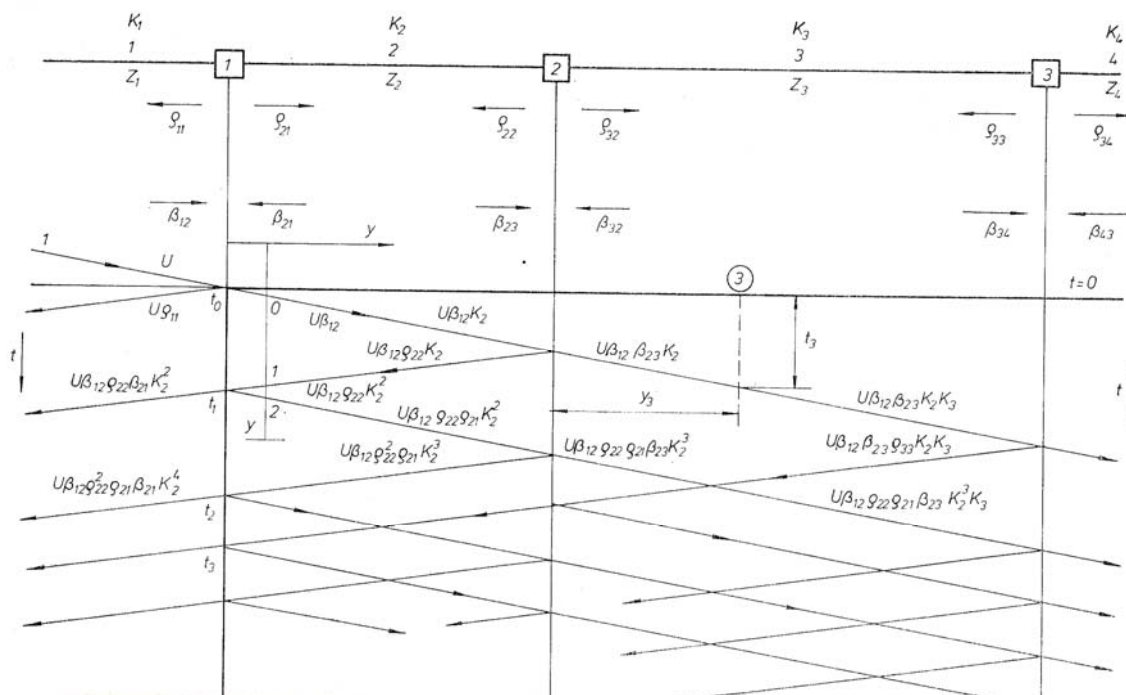
$$u_x + i_x Z_{ekv} = 2 \sum_{m=1}^n \frac{Z_{ekv}}{Z_m} u_{mx} = 2u_{ekv}.$$



Bewley's lattice network - menetdiagram



Három diszkontinuitási pontot tartalmazó rendszer rácshálózata



A Bewley módszer értékelése

- A hullámok sorozatos reflexióját az idő függvényében kíséri végig, időfüggvényeket szolgáltat mind az áramra, mind pedig a feszültségre nézve. Logikája a mérnöki szemlélethez legközelebb áll.
- Egyszerűen szolgáltat eredményt diszkontinuitási pontok közötti szakaszokon is (bár a Bergeron módszerrel is lehet).
- Hátránya, hogy szerkesztési módszerként kezelése – főleg elágazó távvezetékek esetén – nehézkes.
- Koncentrált induktivitást vagy kapacitást tartalmazó hálózat hullámfolyamatainak számítására – a Bergeron módszerhez hasonlóan – nem alkalmas.
- A tranziens karaktere csak a részhullámok szuperponálását követően derül ki.
- A számítást nem lehet közvetlenül az előzmény-állapotokból (fázisáramból, illetve –feszültségből) indítani, hanem csupán "behatoló hullámból".
- Jól használható pl. légköri eredetű túlfeszültségek vizsgálatához

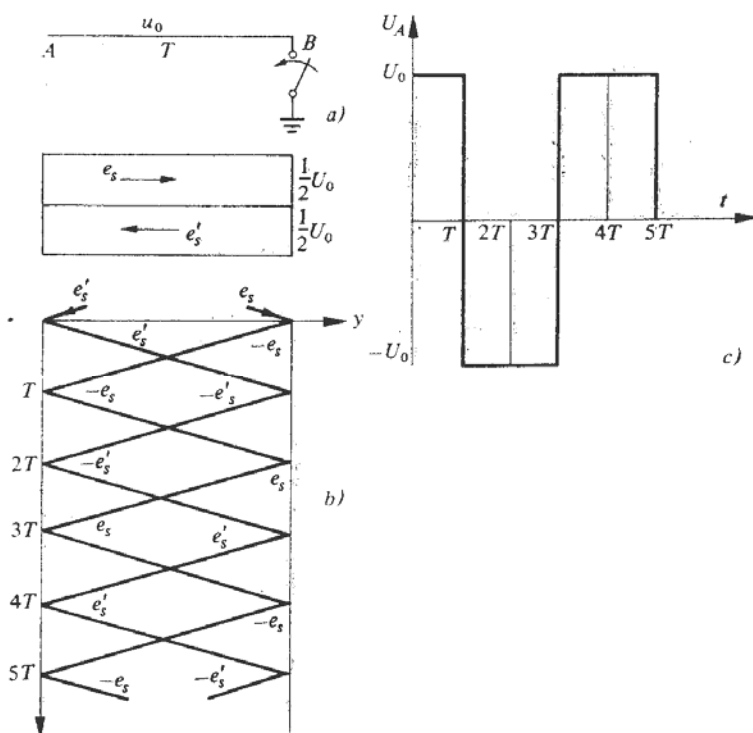
Kapcsolási műveletek szimulációja hullámokkal 1.

- A *cancellation wave* feladata az, hogy megsemmisítse a tranziens előtti állapotot és a beavatkozás helyén a jellemzőknek parancsolt, új értékét valósítsa meg.
- Ha a kapcsolási művelet a hálózat két pontjának összekapcsolását (connection) jelenti, akkor a cancellation wave feszültség-hullám, ha szétkapcsolást (disconnection) jelent, akkor áram-hullám. Utóbbit a megszakítóknál fontos jellemzők, főleg a visszaszökő feszültség meghatározásánál elterjedten használják, injektált áram néven.
- A cancellation wave végtelen hosszú.
- A teljes tranziens a kapcsolás előtti stacioner állapot és a cancellation wave által okozott tranziens állapot szuperpozíciója szolgáltatja.

Kapcsolási műveletek szimulációja hullámokkal 2.

- A *steady-state waves* módszer a távíró egyenletek megoldására épül, ami szerint a vezetékek bármely pontján a fázisfeszültséget és -áramot két, egymással ellentétes hullám (e_s és e_s') állítja elő.
- Ha e_s és e_s' nagyságát ismerjük és az állandósult állapot utolsó pillanatát általuk megvalósítottnak tekintjük, akkor a kapcsolási művelet hatása csupán a a reflexiók együttthatónak a kapcsolat helyén létrejött megváltozásaként jelentkezik.
- A stacioner állapot utolsó pillanatának megfelelő fázisjellemzőiből e_s és e_s' nagysága egyszerűen meghatározható.
- A steady-state hullámok hossza a vezeték hosszával azonos.

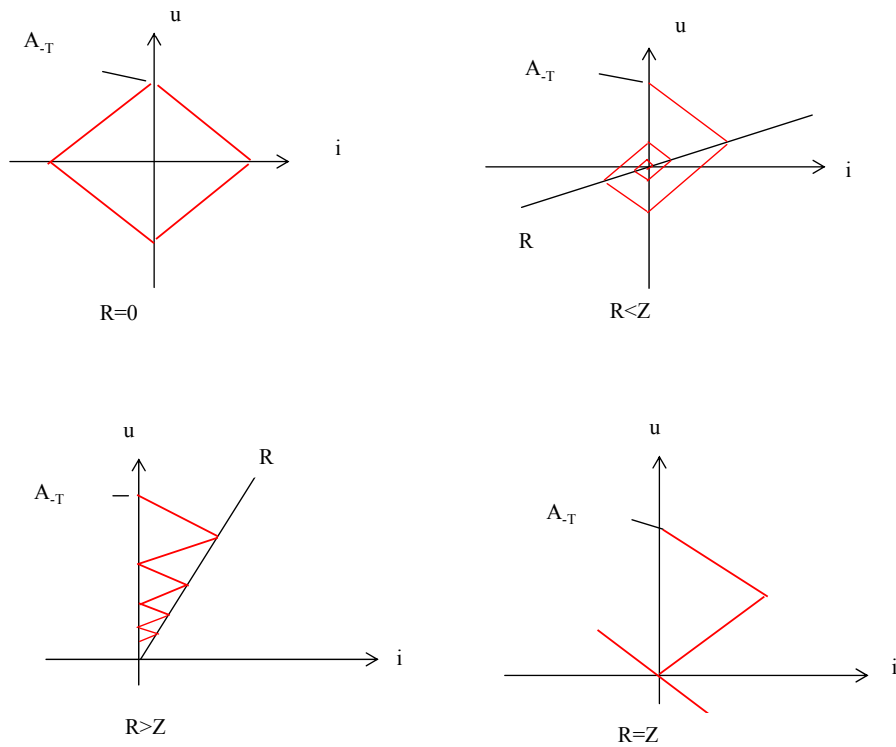
1. példa: feltöltött vezeték kisütési folyamatának vizsgálata Bewley módszerével, a steady-state waves elv alkalmazásával



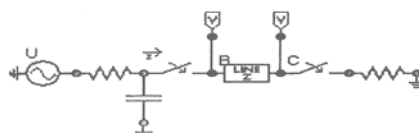
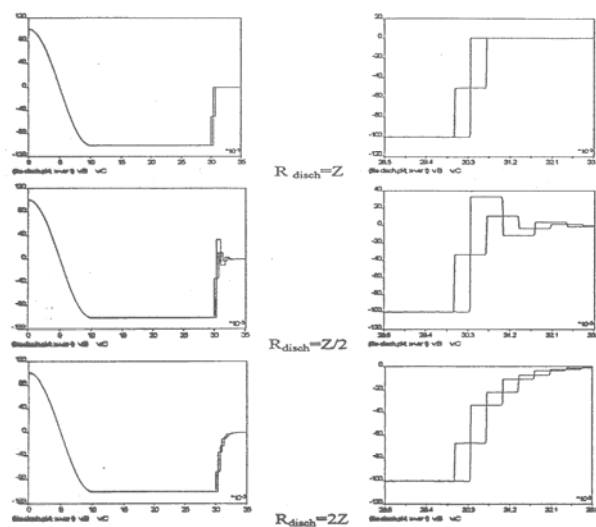
$$u_{B+} = \frac{1}{2}(U_B + I_B Z) = e_s$$

$$u_{B-} = \frac{1}{2}(U_B - I_B Z) = e_s'$$

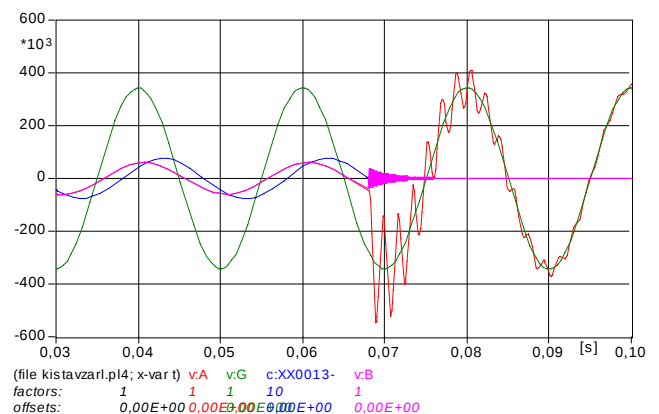
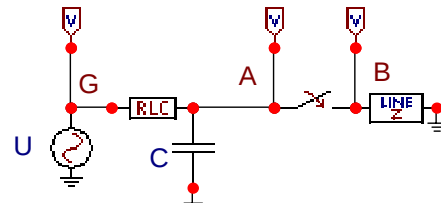
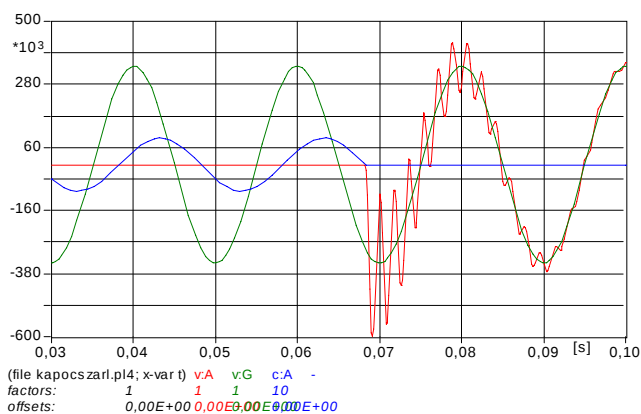
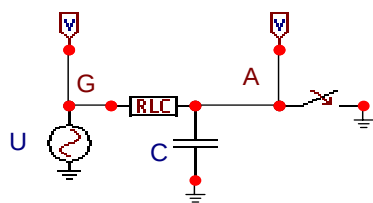
Kontroll: vezetékek kisütési tranziense Bergeron szerint



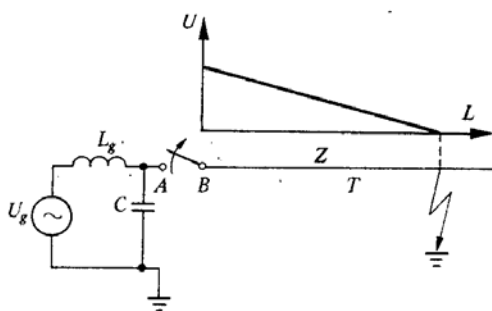
PC: Távvezeték kisütési tranziense az EMTP programmal számolva



2. péda: kapocszárlat és kistávolságú vezetéki zárlat tisztázásának tranziensei. Fázisfeszültségek és fázisáramok.



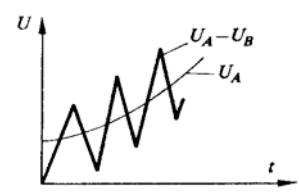
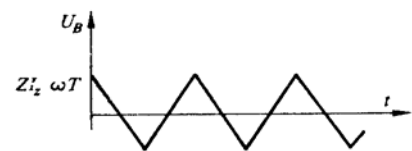
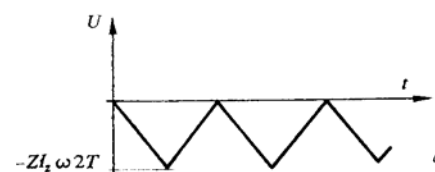
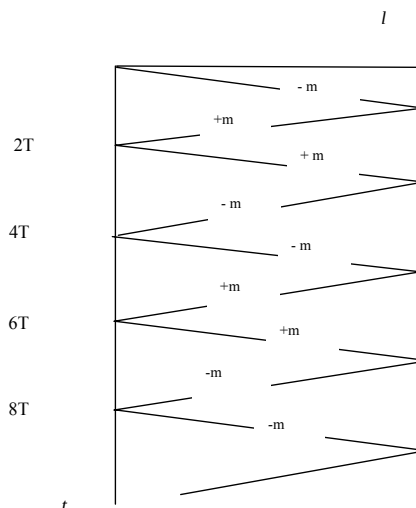
A távolsági zárlat tisztázásának tranziensét először a „cancellation wave” módszerrel elemezzük



$$i_i = -I_z \sin \omega t$$

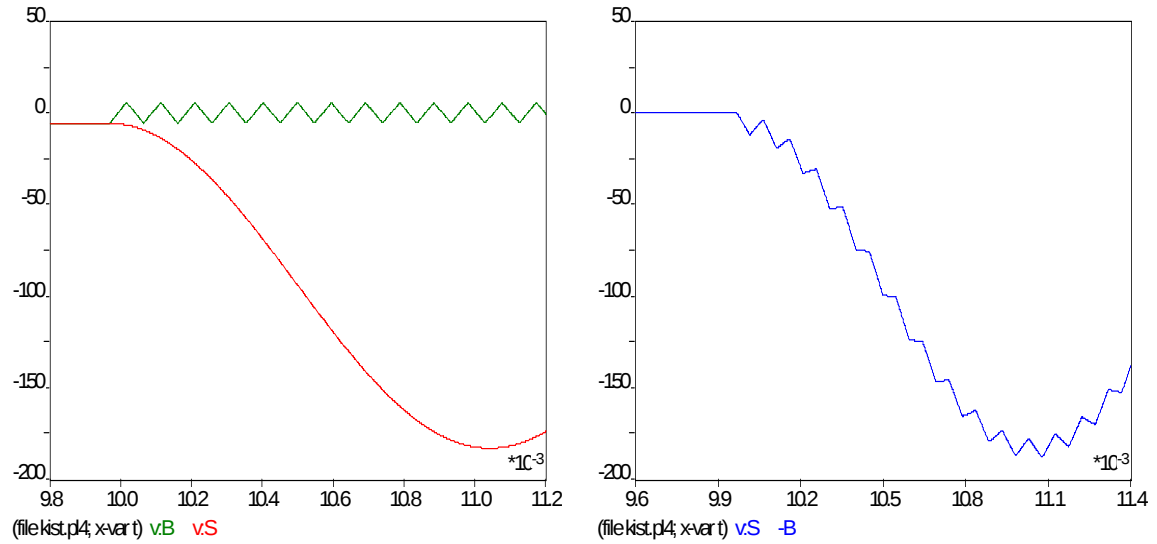
$$u_i = -Z \cdot I_z \sin \omega t \approx -Z_i \omega t$$

$$m_{ui} = -Z_i \omega = m$$

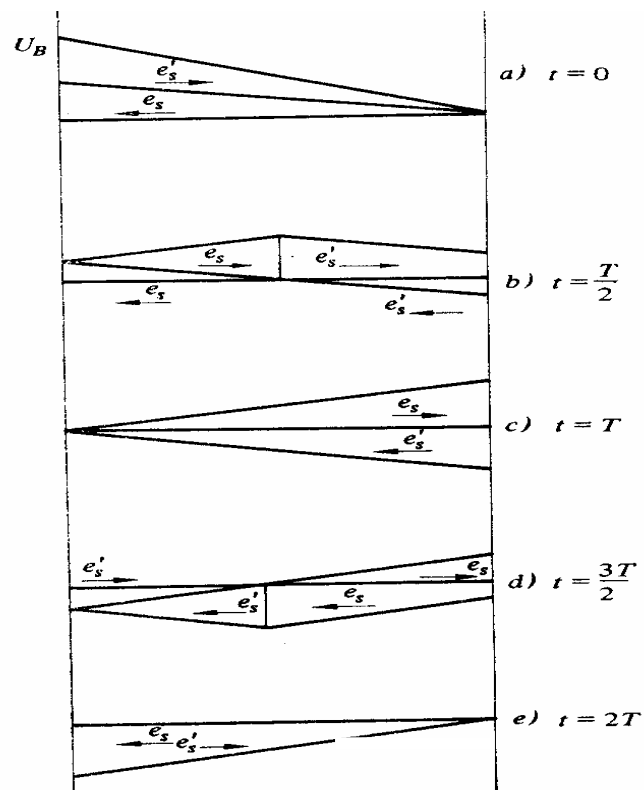


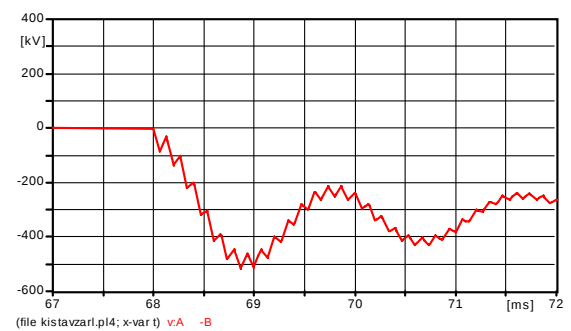
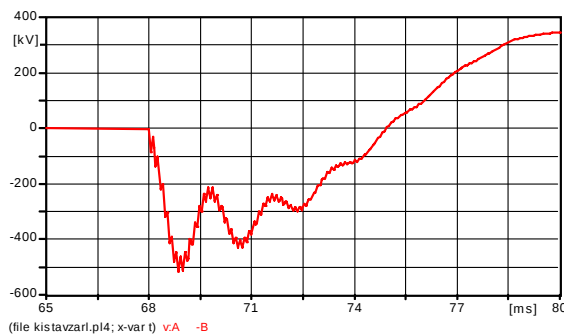
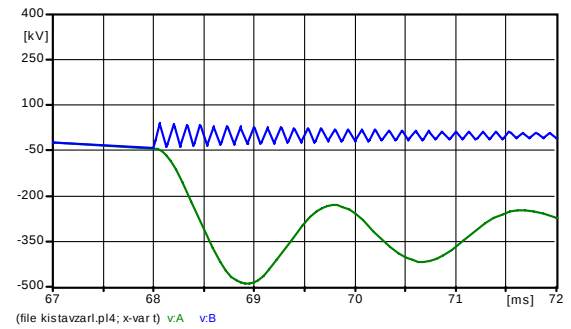
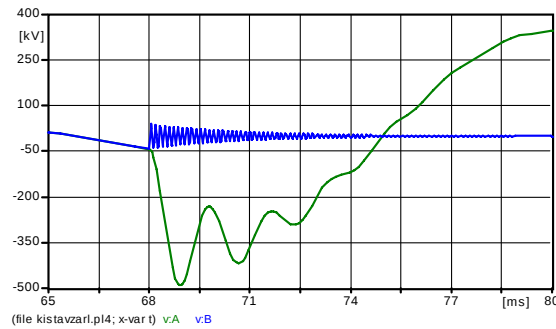
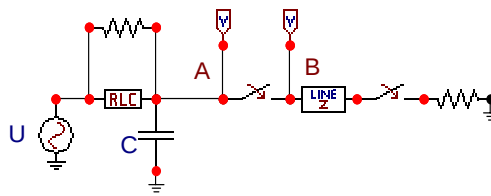
$$U_B = I_z \omega L$$

A visszaszökő feszültség kistávolságú zárlat tisztázása után.
Baloldalon a megszakító-kontaktusok földhöz képesti feszültsége,
jobboldalon a kontaktusok közötti feszültség (VSF ~ TRV).

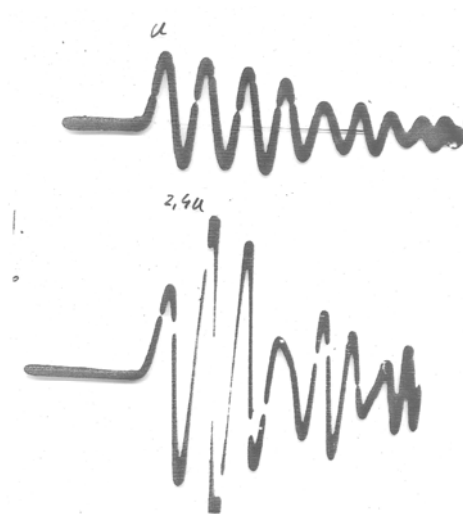


Kistávolságú zárlat tisztázásának tranziensét a „steady-state waves” módszerrel is megnézzük:



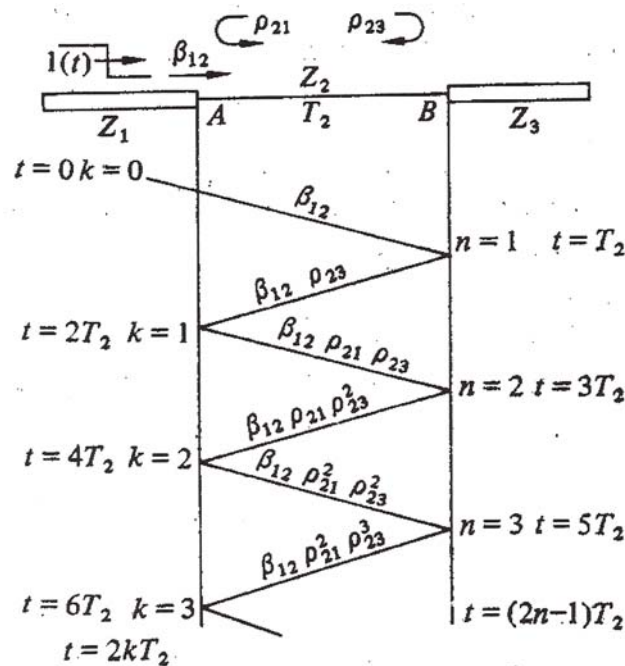


Szabadvezetékre kábellel csatlakozó transzformátor villámcsapás okozta feszültség-igénybevételei.



felső ábra: feszültség a transzformátor bemeneti kapcsán,
alsó ábra: feszültség a delta tekercselés felezőpontjában

Bewley eljárás: mindkét végén végtelen hosszú vezetékkel határolt vezetékszakasz feszültségviszonyainak meghatározása, ha a behatoló hullám egységugrás (1).



Bewley eljárás: mindkét végén végtelen hosszú vezetékkel határolt vezetékszakasz feszültségviszonyainak meghatározása, ha a behatoló hullám egységugrás (2).

A végponton a feszültség értéke az első hullámvisszaverődés idején:

$$(U_A)_{k=1} = \beta_{12} + \beta_{12}\rho_{23} + \beta_{12}\rho_{21}\rho_{23} = \beta_{12} + \beta_{12}\rho_{23}(1 + \rho_{21}).$$

A második visszaverődés idején:

$$(U_A)_{k=2} = \beta_{12} + \beta_{12}\rho_{23}(1 + \rho_{21}) [1 + \rho_{21}\rho_{23}].$$

A k-adik visszaverődés idején:

$$(U_A)_k = \beta_{12} + \beta_{12}\rho_{23}(1 + \rho_{21}) [1 + \rho_{21}\rho_{23} + \rho_{21}^2\rho_{23}^2 + \dots + (\rho_{21}\rho_{23})^{k-1}].$$

Összegezve az $(U_A)_k$ kifejezésben szereplő szorzatokat:

$$(U_A)_k = \beta_{12} + \beta_{12}\rho_{23}(1 + \rho_{21}) \frac{(\rho_{21}\rho_{23})^k - 1}{\rho_{21}\rho_{23} - 1}.$$

Bewley eljárás: mindkét végén végtelen hosszú vezetékkel határolt vezetékszakasz feszültségviszonyainak meghatározása, ha a behatoló hullám egységugrás (3).

A vezeték B végpontján a feszültség értéke az első hullámvisszaverődéstől kezdve:

$$(U_B)_{n=1} = \beta_{12}(1 + \varrho_{23}),$$

a második visszaverődés után:

$$(U_B)_{n=2} = \beta_{12}(1 + \varrho_{23}) [1 + \varrho_{21}\varrho_{23}],$$

a harmadik visszaverődéskor:

$$(U_B)_{n=3} = \beta_{12}(1 + \varrho_{23}) [1 + \varrho_{21}\varrho_{23} + (\varrho_{21}\varrho_{23})^2],$$

az n -edik visszaverődéskor:

$$\begin{aligned} (U_B)_n &= \beta_{12}(1 + \varrho_{23}) [1 + \varrho_{21}\varrho_{23} + (\varrho_{21}\varrho_{23})^2 + \dots + (\varrho_{21}\varrho_{23})^{n-1}] = \\ &= \beta_{12}(1 + \varrho_{23}) \frac{(\varrho_{21}\varrho_{23})^n - 1}{\varrho_{21}\varrho_{23} - 1}. \end{aligned}$$

Bewley eljárás: mindkét végén végtelen hosszú vezetékkel határolt vezetékszakasz feszültségviszonyainak meghatározása, ha a behatoló hullám egységugrás (4).

Bevezetve a következő jelöléseket:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = a, \quad \frac{Z_2}{Z_3} = b, \quad \varrho_{21}\varrho_{23} = \frac{1-a}{1+a} \frac{1-b}{1+b} = C,$$

a végpontok feszültségére a következő kifejezéseket nyerjük:

$$(U_A)_k = \frac{2a}{a+b} \left(1 - \frac{1-b}{1+a} C^k \right) = \frac{2a}{a+b} \left(1 - \frac{1-b}{1+a} e^{k \ln C} \right),$$

és

$$(U_B)_n = \frac{2a}{a+b} (1 - C^n) = \frac{2a}{a+b} (1 - e^{n \ln C}).$$

Ha a vezeték végein a reflexiók együtthatók azonos előjelűek:

$a \ll 1$ és $b \ll 1$ esetre

$$(U_A)_k = \frac{2a}{a+b} \left(1 - \frac{1-b}{1+a} e^{-2(a+b)k} \right),$$

$$(U_B)_n = \frac{2a}{a+b} (1 - e^{-2(a+b)n});$$

$a \gg 1$ és $b \gg 1$ esetre

$$(U_A)_k = \frac{2a}{a+b} \left(1 - \frac{1-b}{1+a} e^{-2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)k} \right),$$

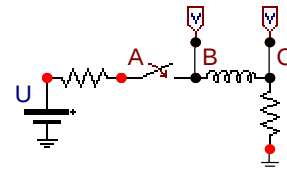
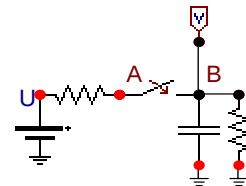
$$(U_B)_n = \frac{2a}{a+b} \left(1 - e^{-2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)n} \right),$$

$$(U_C)_{(2k+1)T_2} = \frac{2a}{a+b} \left[1 - \frac{1-b}{1+a} (1-a^2) e^{-2(a+b)k} \right],$$

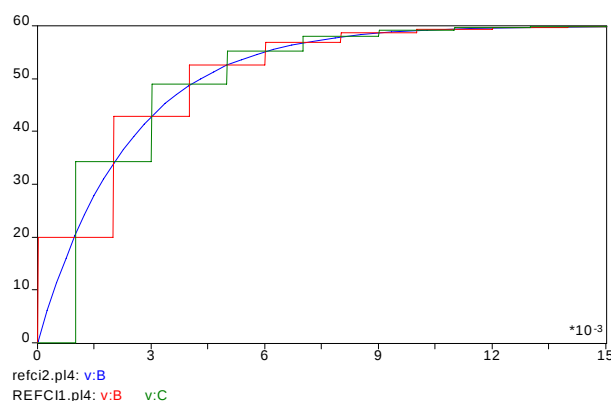
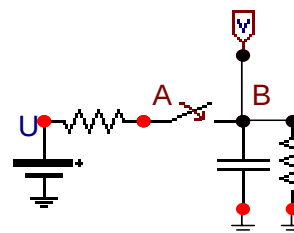
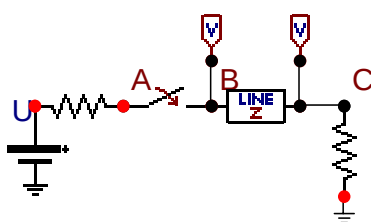
$$(U_C)_{2nT_2} = \frac{2a}{a+b} [1 - e^{-2(a+b)n}],$$

$$(U_{A'})_{(2k+1)T_2} = \frac{2a}{a+b} \left[1 - \frac{1-b}{1+a} \left(1 - \frac{1}{a^2} \right) e^{-2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)k} \right],$$

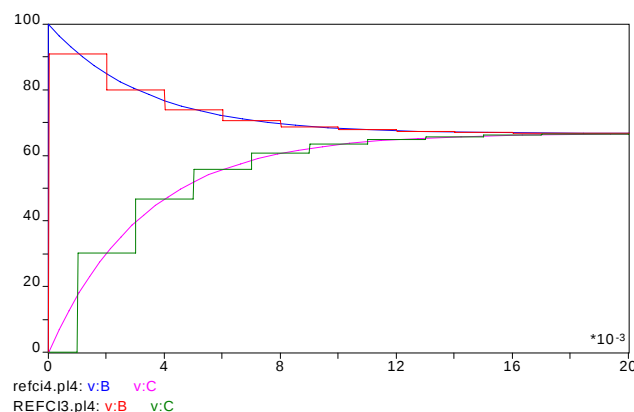
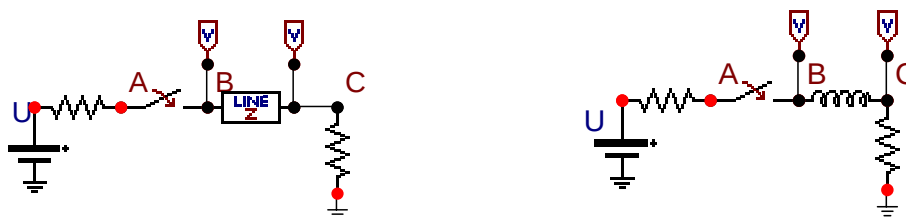
$$(U_{B'})_{2nT_2} = \frac{2a}{a+b} [1 - e^{-2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)n}].$$



Referencia-kapcsolás mindkét végén nagyobb (hullám-) ellenállással határolt vezetékekre



Referencia-kapcsolás mindkét végén kisebb (hullám-) ellenállással határolt vezetékre



Referencia-kapcsolás egyik végén a vezeték hullámellenállásánál kisebb, másik végén nagyobb ellenálláshoz csatlakozó vezetékre

- Feltételezzük, hogy a referenciakör induktivitása a vezetékinduktivitás β -szorosa, a referenciakör kapacitása a vezetékkapacitás α -szorosa.
- Megköveteljük az alapharmonikus frekvenciájának pontos egyezését.
- Arra törekszünk, hogy a referenciakörben a lengés kezdőfázisa, amplitúdója és tengelye minél jobban közelítse meg a vezetéklengés alapharmónikusának hasonló jellemzőit.
- Fenti célokat feltételes szélsőérték-számítással lehet elérni (Lagrange tétel), aminek alkalmazásával adódik α és β értéke.
- Speciális esetek:
 - Ha $Z_1=0$, $\alpha=0.5$ és $\beta=0.81$
 - Ha $Z_3=\infty$, $\alpha=0.81$ és $\beta=0.5$

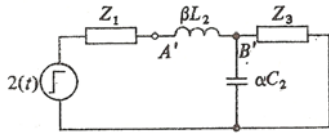
$$\frac{A}{Z_1} \quad \frac{B}{Z_2} \quad \frac{Z}{Z_3} \quad Z_1 < Z_2 < Z_3$$

$$(U_A)_k = \frac{2a}{a+b} \left(1 - \frac{1-b}{1+a} C^k \right) = \frac{2a}{a+b} \left(1 - \frac{1-b}{1+a} e^{k \ln C} \right)$$

$$(U_B)_n = \frac{2a}{a+b} (1 - C^n) = \frac{2a}{a+b} (1 - e^{n \ln C})$$

$$\alpha = \frac{2}{\pi} \sqrt{ab}$$

$$\beta = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{ab}}$$



$$U_{\alpha C_2} = \frac{2a}{a+b} \{1 - e^{-\gamma t} [A \sin(\omega_0 t - \varphi)]\},$$

$$\omega'_0 = \frac{2\pi}{4T_2} = \frac{\pi}{2T_2}$$

$$A' = 1;$$

$$\varphi'_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{2T_2} \sqrt{\frac{4}{\alpha\beta} \left(\frac{b}{a} + 1\right) - q^2},$$

$$A = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\omega_0 T_2} q\right)^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{2T_2} q,$$

$$\varphi \approx \frac{\pi}{2} - \frac{1}{\pi} q,$$

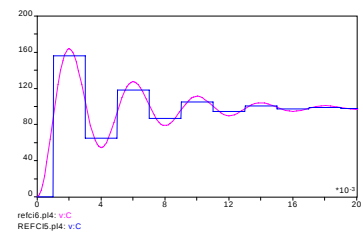
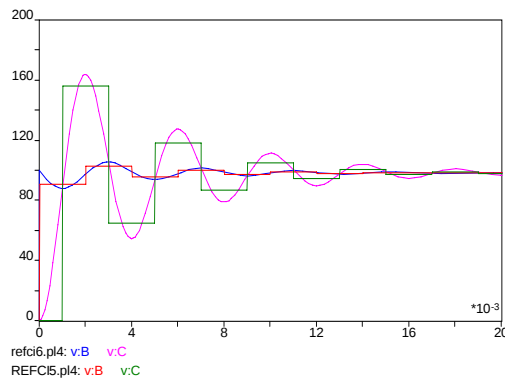
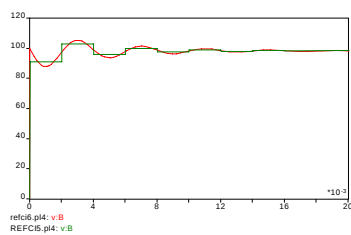
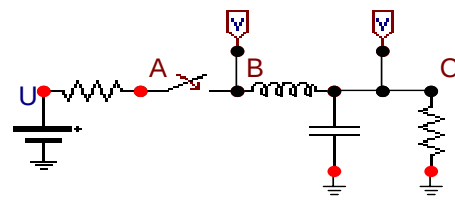
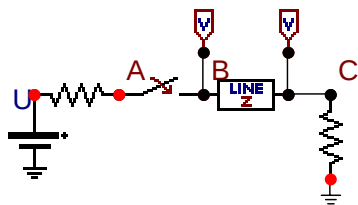
$$q = \frac{b}{\alpha} + \frac{1}{\alpha\beta}.$$

Keressük q minimumát az $\omega = \omega'$ feltétel mellett. Eredmény: q akkor minimális, ha

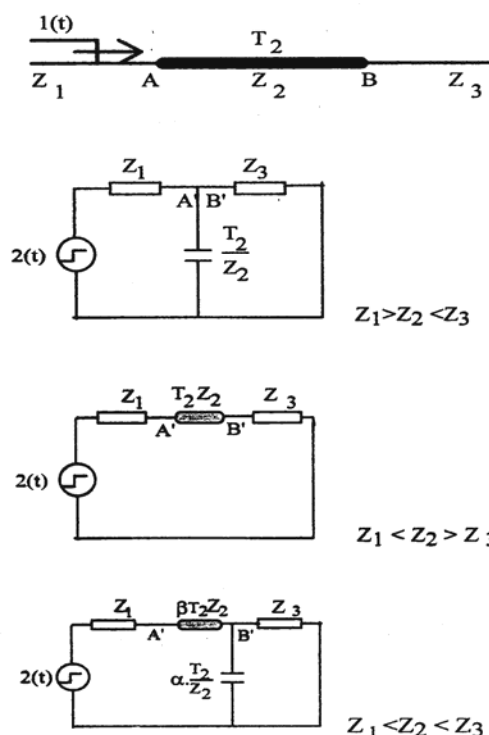
$$\alpha = \frac{2}{\pi} \sqrt{ab}$$

$$\beta = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{ab}}$$

Folytatás



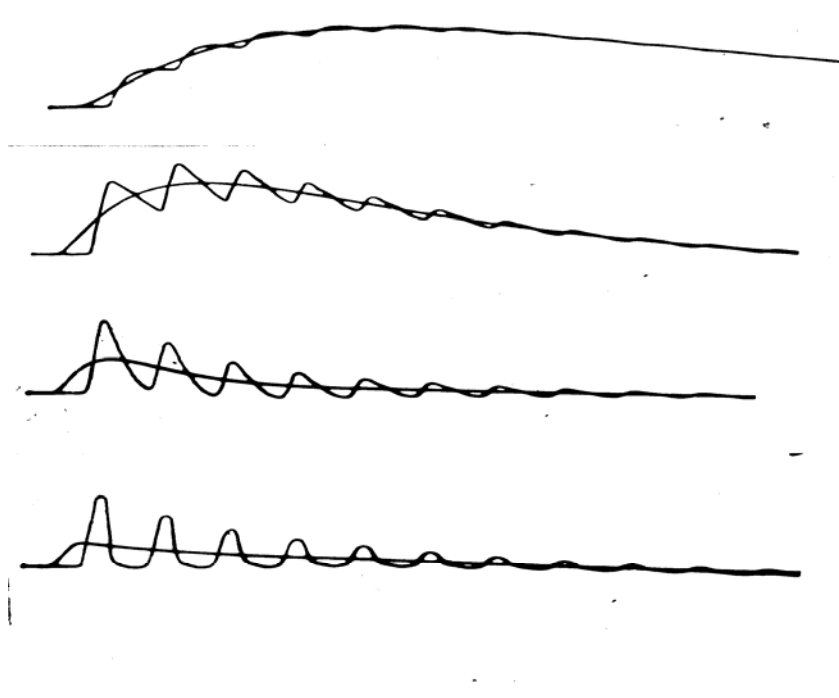
A referencia-alapkapcsolások összefoglalása



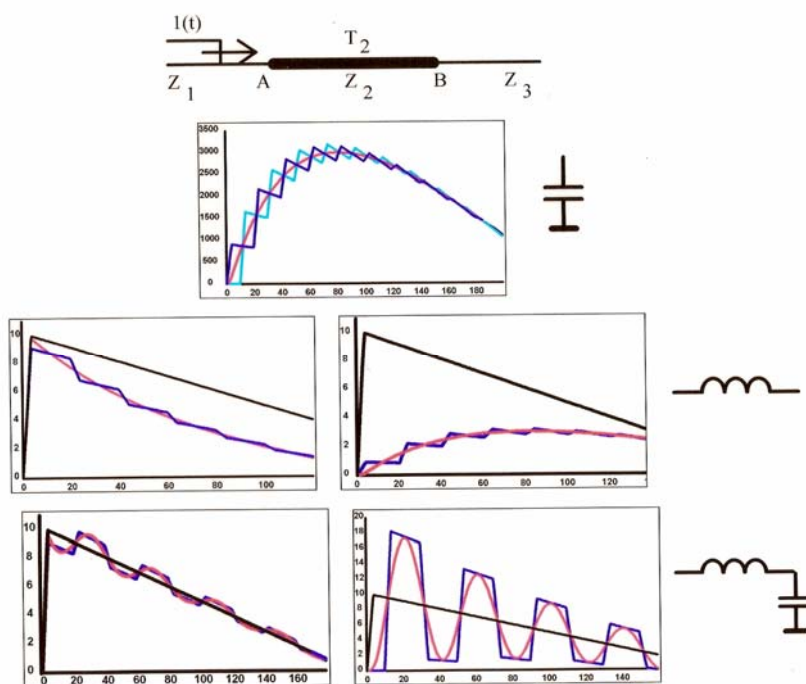
A hullámalak hatása a referencia-kapcsolás pontosságára (1)

- Amennyiben a hálózat valamely pontjára a hálózaton, illetve a referenciakörben kialakuló, megfelelő (feszültség, illetve áram-) görbéket egymásra rajzoljuk, a referenciakör folyamatos görbéi a hálózat lépcsős görbéit minden lépcsőben legalább kétszer metszik.
- A hálózat valamely pontjára felrajzolt hálózati, illetve referenciaköri görbék úgy metszik egymást, hogy a két görbe közötti, előjelesnek vett területek $2T_2$ időintervallumon belül kiegyenlítik egymást.

A hullámalak hatása a referencia-kapcsolás pontosságára (2)

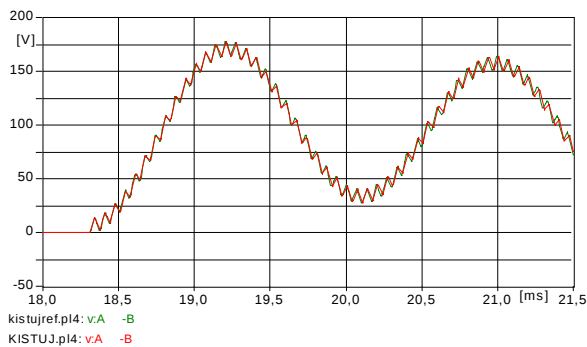
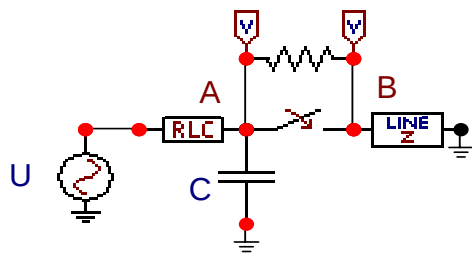


A hullámalak hatása a referencia-kapcsolás pontosságára (3)

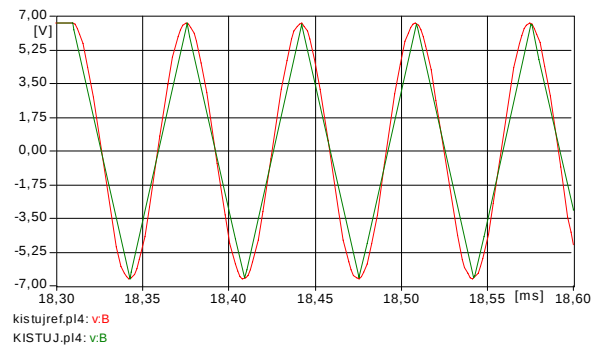
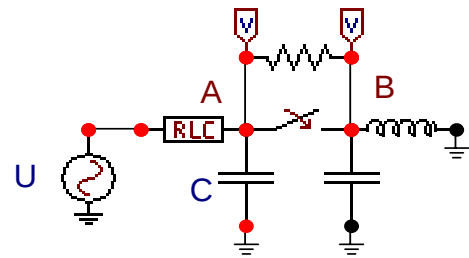


1.Példa: kistávolságú zárlat tisztázása

valódi hálózat



referencia-kapcsolás



A referencia-kapcsolás elemeinek számítása kistávolságú zárlat tisztázásánál

$L = \beta \cdot Z \cdot T$, a jelen esetben célszerű $\beta = 1$ felvétele.

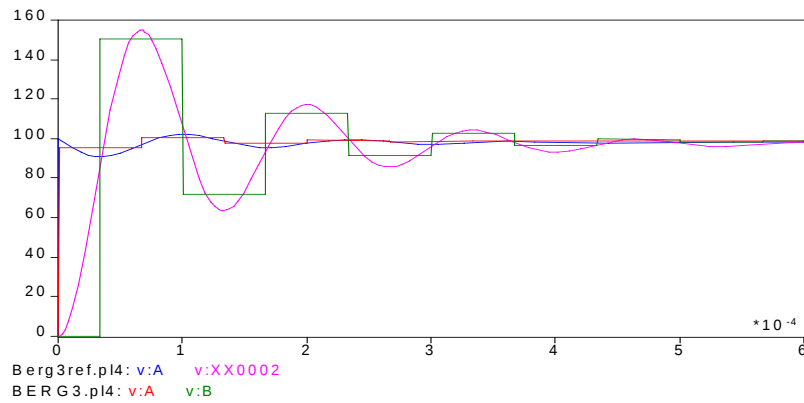
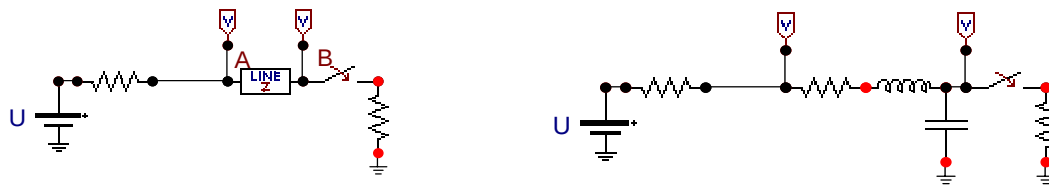
Ekkor $\alpha = 4/\pi^2 \approx 0.4$ – re adódik, tehát $C \approx 0.4 \cdot T/Z$ lesz.

Ugyanis:

$$\frac{1}{2\pi \sqrt{\beta Z \frac{T}{2} \alpha \frac{T}{2}}} = \frac{1}{2\pi T \sqrt{\alpha\beta}} = \frac{1}{4T} = f$$

Ebből $\alpha \cdot \beta = 4/\pi^2$, tehát $\beta = 1$ felvétele esetén a referencia kapcsolás lengésének és a valódi hálózat lengési alapharmonikusának egyezését $\alpha = 4/\pi^2 \approx 0.4$ biztosítja.

2. példa: terhelés-ledobás



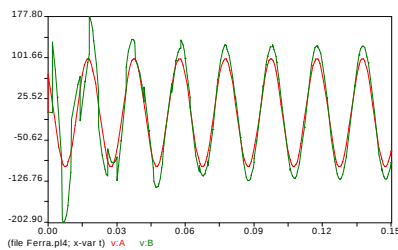
3.példa: Ferranti effektus tranziensei

vezeték hosszak:

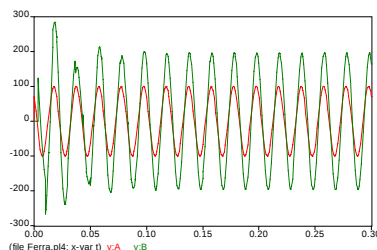
600 km, $f=1/4T=125$ Hz, 1000 km, $f=1/4T=75$ Hz, 1500 km, $f=1/4T=50$ Hz

piros görbék: tápponti feszültség, zöld görbék: a nyitott végpont feszültsége

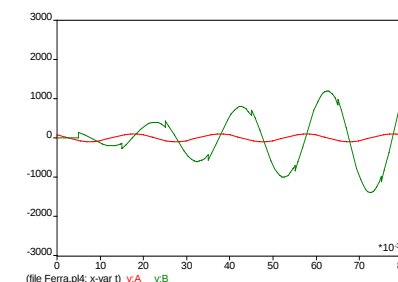
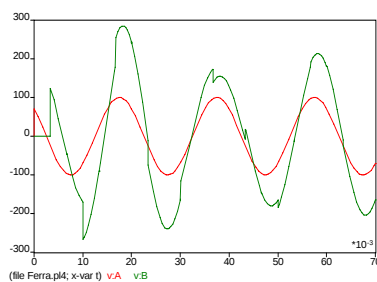
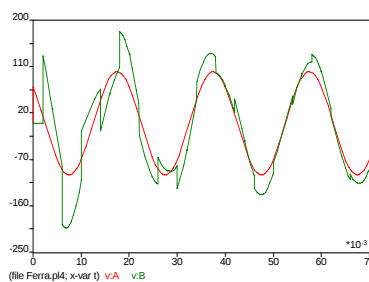
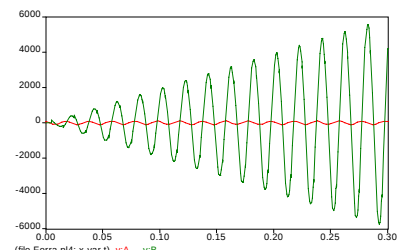
600 km



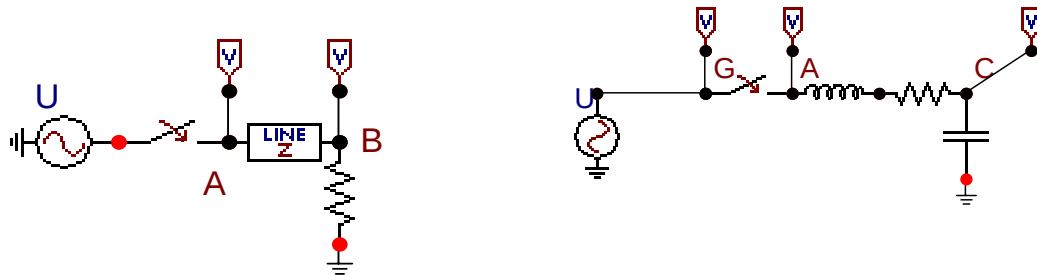
1000 km



1500 km



Hosszú vezeték bekapcsolása egyik végpontján (valódi hálózat és referencia-kapcsolás)



vezetékparaméterek:

$$Z=400 \text{ ohm}$$

$$l=600 \text{ km}; T=2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

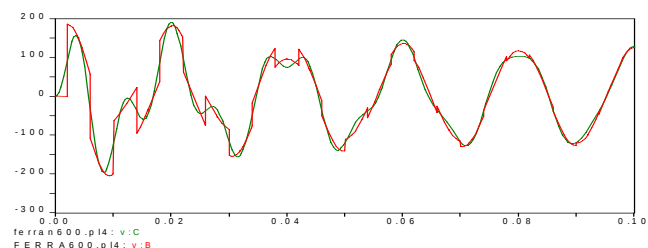
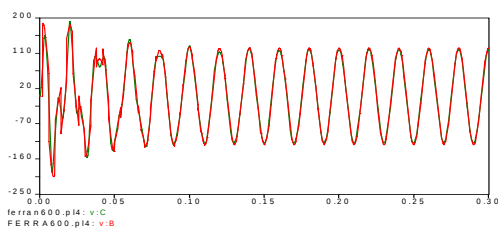
a referencia kapcsolás paraméterei:

$$L=Z \cdot T=800 \cdot 10^{-3}; L_{rc}=0.5L=400 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

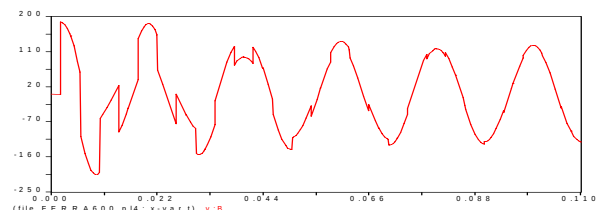
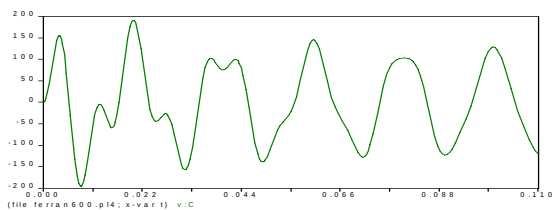
$$C=T/Z=5 \cdot 10^{-6} \text{ F}; C_{rc}=0.81C=4.05 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Példa: a referencia-kapcsolás szimulációs pontossága ($l=600 \text{ km}$)

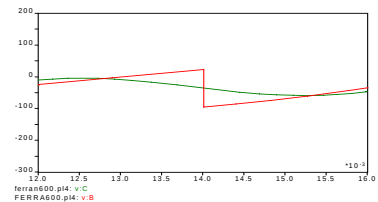
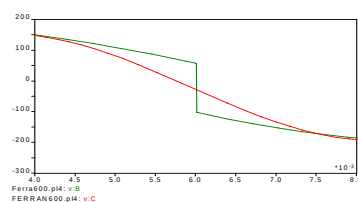
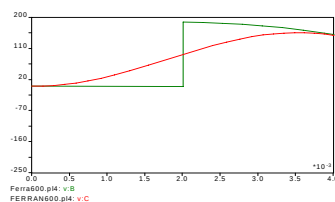
A valódi hálózat B és a referencia-kapcsolás C pontjában kialakuló feszültségek:



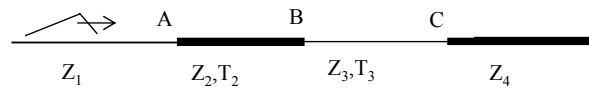
A referenciakör és a valódi hálózat feszültséggörbéinek jellegzetes eltérései:



A valódi hálózat és a referenciakör feszültséggörbéi által bezárt területek:



Két véges hosszúságú vezetéket tartalmazó hálózat referencia-kapcsolása



Ha $T_3 > T_2$, akkor úgy vehető, hogy $T_3 = \infty$. Ha $T_3 < T_2$, akkor a következő kompromisszumot alkalmazhatjuk:

AB vezeték referenciakörét első lépésben úgy alakítjuk ki, ahogyan A és B ponti reflexiós koefficiensek megkövetelik. Utána módosítjuk annak érdekében, hogy a referenciakör a Z_2/Z_4 aránynak is megfeleljen. Eszerint kreálunk egy fiktív reflexiós együtthatót:

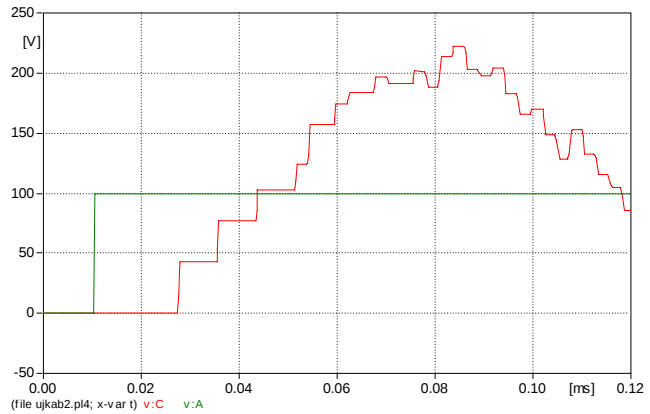
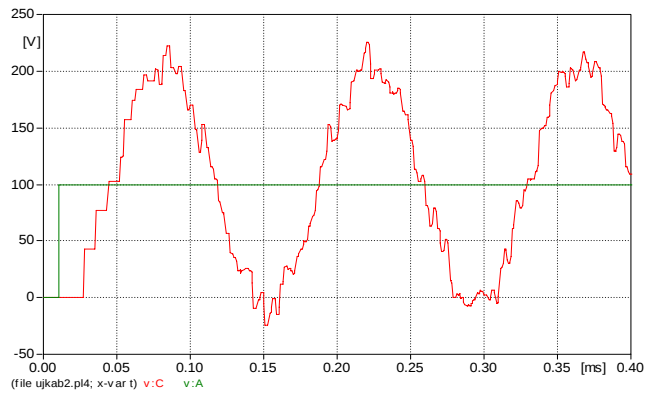
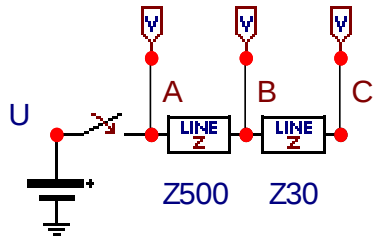
$$\rho_{24} = \frac{Z_4 - Z_2}{Z_4 + Z_2}$$

Ezután a referenciakört úgy egészítjük ki, hogy az mind ρ_{21} , mind ρ_{23} , mind pedig ρ_{24} visszaverődési együtthatók által megszabott követelmények tendenciájának egyaránt eleget tegyen.

Táblázat $T_3 < T_2$ esetre

$\rho_{21} \cdot \rho_{23} > 0$				$\rho_{21} \cdot \rho_{23} < 0$			
$\rho_{23} > 0$		$\rho_{23} < 0$		$\rho_{23} > 0$		$\rho_{23} < 0$	
$\rho_{42} > 0$	$\rho_{42} < 0$	$\rho_{42} > 0$	$\rho_{42} < 0$	$\rho_{42} > 0$	$\rho_{42} < 0$	$\rho_{42} > 0$	$\rho_{42} < 0$
	$\beta = 0,4$	$\alpha = 0,4$		$a = \frac{Z_2}{Z_1}$	$\alpha = 0,4$	$\beta = 0,4$	$a = \frac{Z_2}{Z_1}$
				$b = \frac{Z_2}{Z_4}$			$b = \frac{Z_2}{Z_4}$

Szabadvezeték és kábel együttes feszültségre kapcsolása 1.



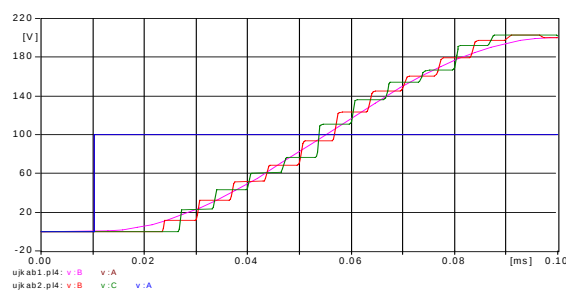
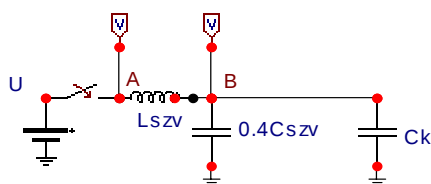
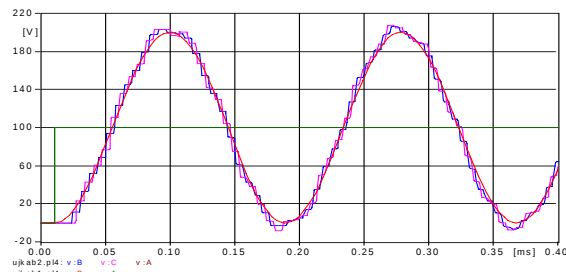
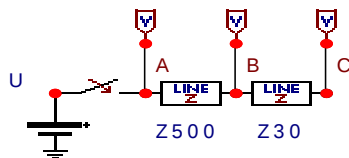
Szabadvezeték és kábel együttes feszültségre kapcsolása 2.

A szabadvezeték adatai: hossza 4 km, hullámellenállása 500 ohm.

$T_{szv}=13.34 \mu s$, $C_{szv}=0.02667 \mu F$, $L_{szv}=6.665 mH$.

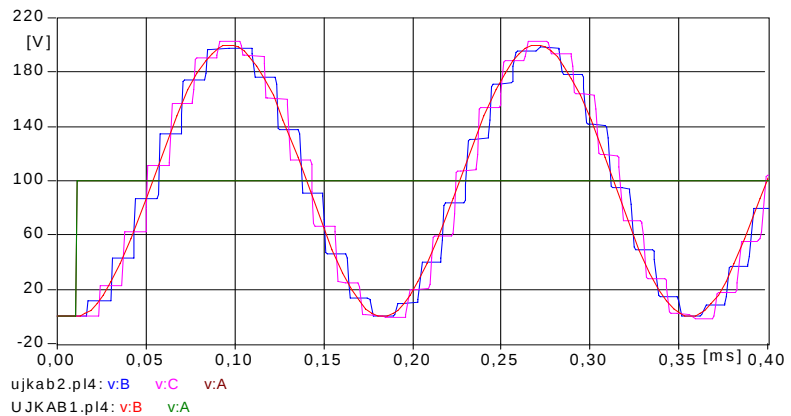
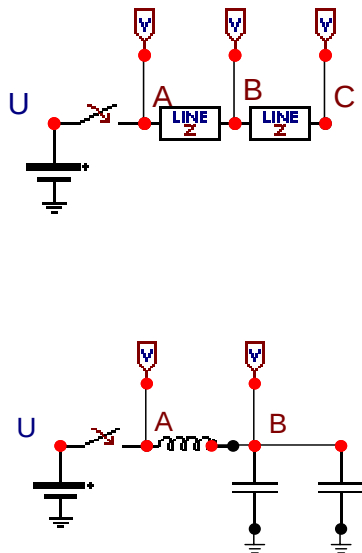
A kábel adatai: hossza 0.5 km, hullámellenállása 30 ohm.

$T_k=3.34 \mu s$, $C_k=0.111 \mu F$



Két egyenlő befutási idejű vezeték bekapcsolása

Szabadvezeték: $Z_{szv}=500\text{ohm}$, $l_{szv}=2000\text{m}$ $T_{szv}=6.66\mu\text{s}$ kábel:
 $Z_k=30\text{ ohm}$ $l_k=1000\text{m}$, $T_k=6.66\mu\text{s}$



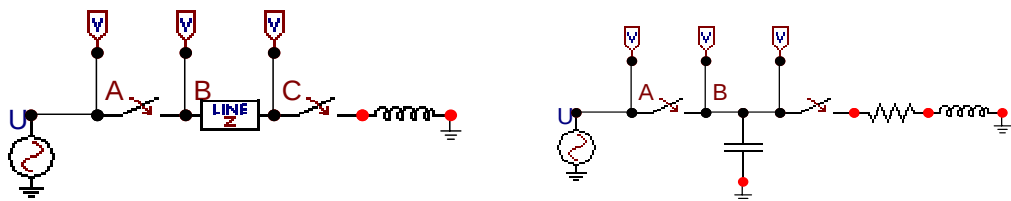
Koncentrált induktivitással, vagy kapacitással modellezett hálózati komponens mellett fekvő vezeték referenciaköre

- Ilyen hálózati konfiguráció esetén ajánlatos a szóbanforgó, koncentrált komponens átmenetileg vezetékké alakítani.
- Célszerű a koncentrált komponens helyettesítő vezetékét a vizsgált vezetékkel egyenlő, vagy hosszabb befutási idejűre választani.
- A koncentrált komponens helyettesítő vezeték hullámmellenállása egyszerűen informál bennünket arról, hogy a valódi vezeték referencia-áramköre miképpen alakítandó ki.

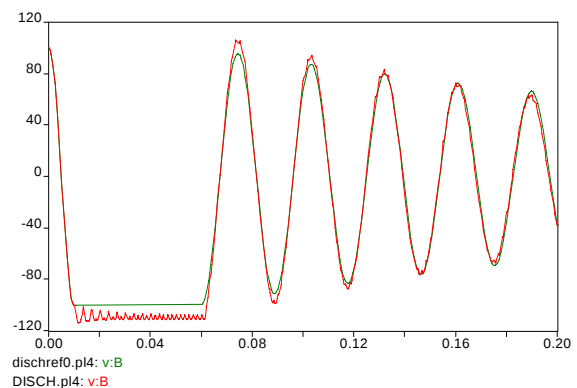
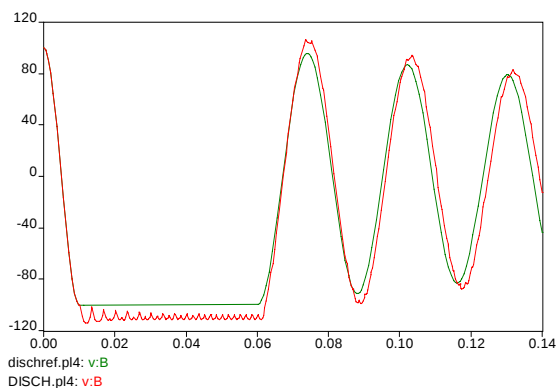
Példa: távvezeték induktivitáson keresztüli kisütése

A távvezeték paraméterei: $Z_t=500 \text{ ohm}$, $l_t= 500 \text{ km}$, $T_t=1.667 \cdot 10^{-3}\text{s}$
 $C_t=T_t/Z_t=3.33 \text{ }\mu\text{F}$, $L_t=Z_t \cdot T_t=833 \text{ mH}$. A kisütő induktivitás: $L=6\text{H}$.

A kisütő induktivitást a távvezetékkel azonos befutási idejű távvezetékké átalakítva, utóbbi hullámellenállása: $Z_L= 6/T_t = 3600 \text{ ohm} \gg Z_t$. Eszerint a referencia áramkörben a vezetéket kapacitásával helyettesítjük

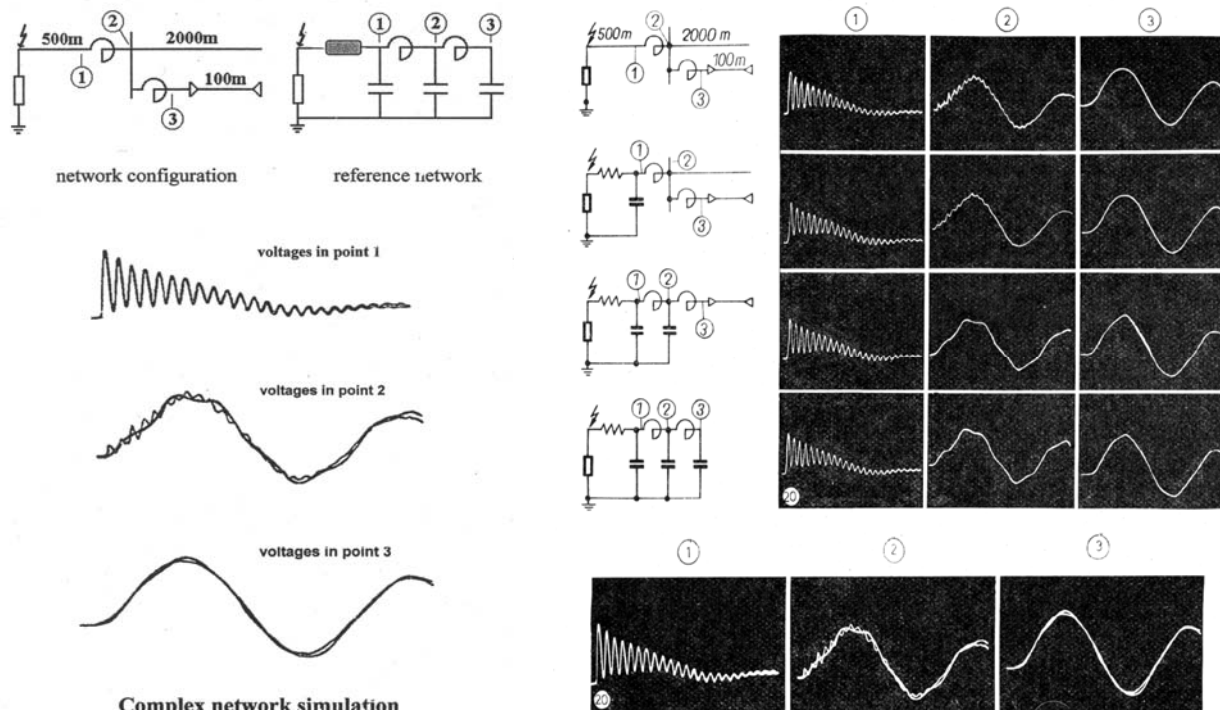


A példa folytatása

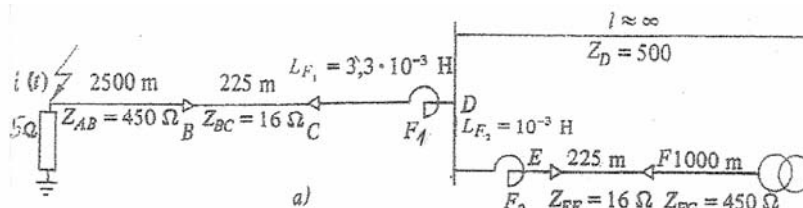


A helyettesítő vezeték távoli végéhez csatlakozó impedanciának a figyelembevétele a referencia áramkör pontosságát növeli. Modellezzük a nagy (6H) induktivitású tekercsen való kisütés esetében is C-L körrel a vezetéket a referencia kapcsolásban (a referenciakör induktivitása ezzel megnő, értéke $6+0.3332=6.3332\text{H}$ lesz). Ezzel a referencia-kapcsolás pontosan leképezi a kisütési tranziens frekvenciáját is.

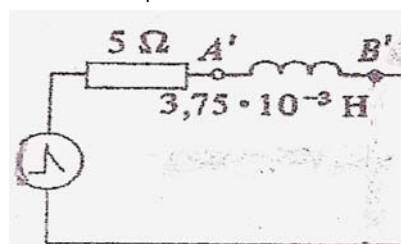
A referencia-kapcsolás fokozatos kialakítása



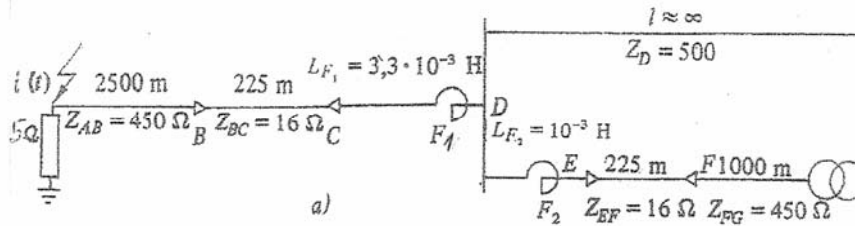
Bonyolult hálózat referencia-kapcsolásának felépítése 1.



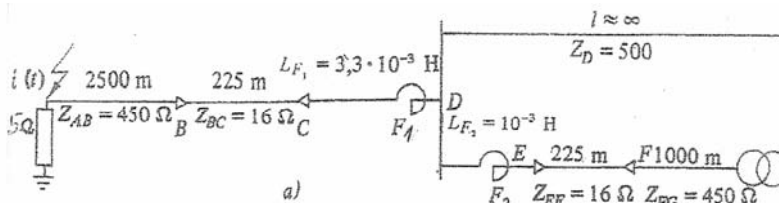
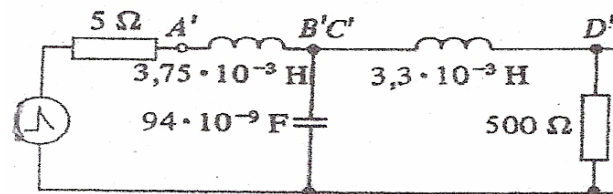
- BC rövidebb AB-nél, ezért az AB szakasz helyettesítésébe a C ponti reflexiók is beleszólnak. A 3.3 mH induktivitású fojtótekercset AB-vel azonos, vagy annál hosszabb vezetékke alakítjuk:
- $T_{AB} = 2500 \text{ m} / 300 \text{ m} / \mu\text{s} = 8.33 \mu\text{s}$. Ezzel
- $Z_{F1} = L_{F1} / T_{AB} = 3.3 \cdot 10^{-3} / 8.33 \cdot 10^{-6} = 400 \text{ ohm} < 450 \text{ ohm}$.
- Ennélfogva AB szakasz induktív jellegű. Megfelelője a referencia-kapcsolásban:
- $L_{AB} = 450 \cdot 8.33 \cdot 10^{-6} = 3.75 \cdot 10^{-3} \text{ H}$.



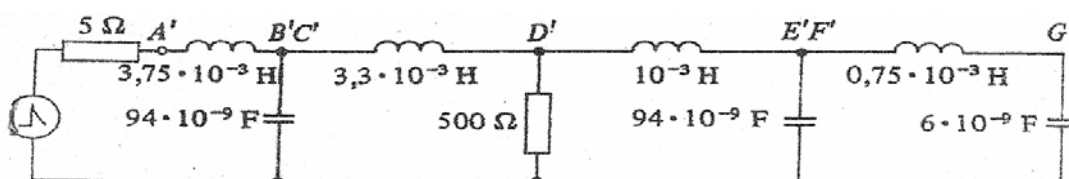
Bonyolult hálózat referencia-kapcsolásának felépítése 2.



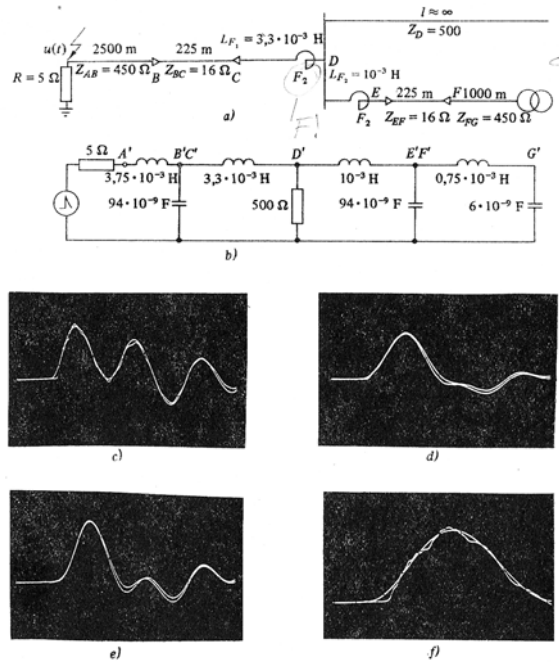
- B és C pontok közötti kábel rövid és Z_k hullámellenállása 450 ohm. $Z_k = 16 \text{ ohm} < 400 \text{ ohm} = Z_{F1}$. Eszerint a kábel megfelelője a referencia-kapcsolásban söntkondenzátor. Ennek nagyságát az alábbiak szerint határozzuk meg:
- $T_k = 225 \text{ m} / 150 \text{ m} / \mu\text{s} = 1.5 \mu\text{s}$. $C_k = T_k / Z_k = 1.5 \cdot 10^{-6} / 16 = 94 \cdot 10^{-9}$.
- Az 500 ohm hullámellenállású, végtelen hosszú vezeték megfelelője a referencia-kapcsolásban 500 ohmos söntellenállás.



- FG vezeték szimulációjához vezetékké alakítjuk át F_2 fojtótekercset: $T_{FG} = 1000 \text{ m} / 300 \text{ m} / \mu\text{s} = 3.33 \cdot 10^{-6} \text{ s}$; $Z_{F2} = 10^{-3} \text{ H} / 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 303 \text{ ohm} < 450 \text{ ohm}$.
- FG szabadvezeték szimulációja rezgőkör, mert a transzformátor tekercselésének hullámellenállása 10 Kohm nagyságrendű. A rezgőkör komponensei:
 $L = 0.5 \cdot 3.33 \cdot 10^{-6} \cdot 450 = 0.75 \cdot 10^{-3} \text{ H}$; $C = 0.81 \cdot 3.33 \cdot 10^{-6} / 450 = 6 \cdot 10^{-9} \text{ F}$
- EF kábel két, nagy impedanciájú komponens között fekszik. Ezért szimulációja sönt kondenzátor, amelynek kapacitása: $C_k = T_k / Z_k = 1.5 \cdot 10^{-6} / 16 = 94 \cdot 10^{-9} \text{ F}$.

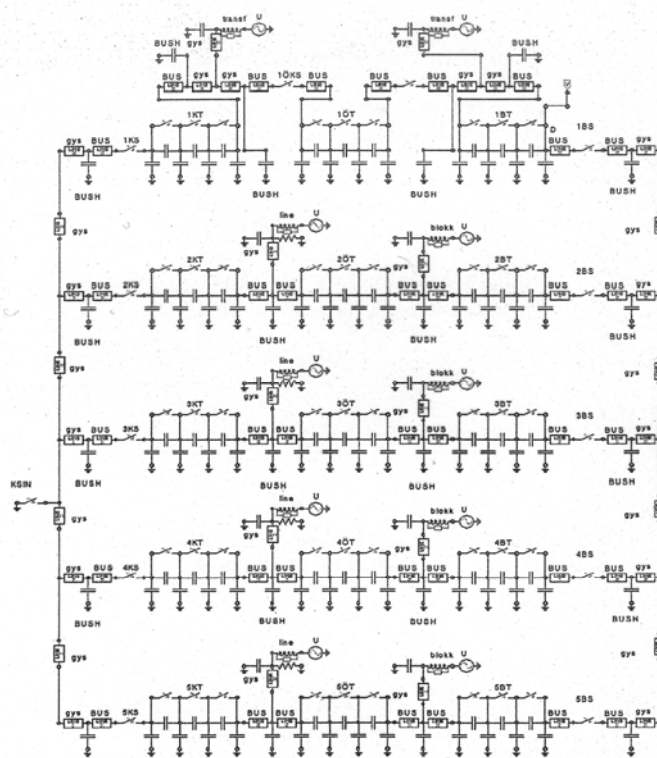


Eredmények

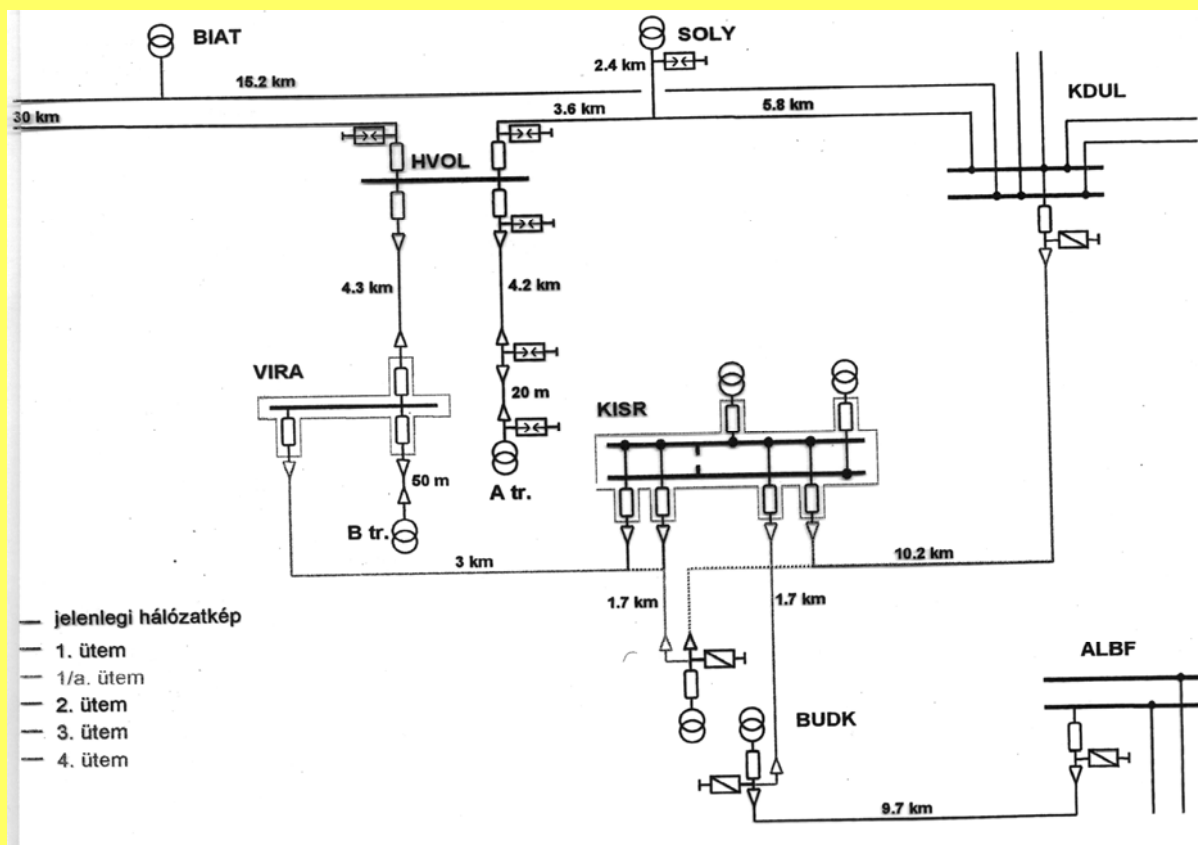


a) a vizsgált hálózat; b) az átalakítás eredménye; c) u_B és $u_{B'}$; d) u_D és $u_{D'}$; e) u_G és $u_{G'}$; f) u_B és $u_{B'}$ növelt léptékben

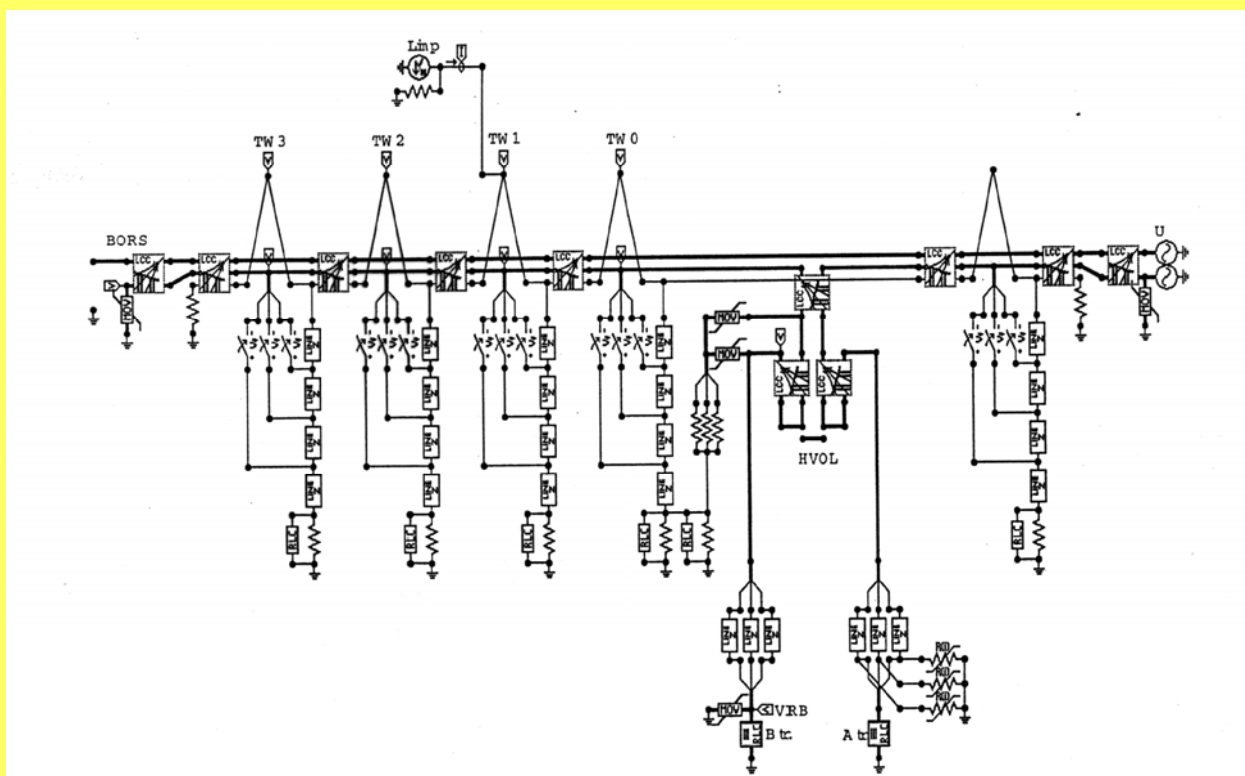
Hálózat tranziens viselkedésének vizsgálata 1.



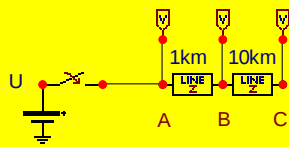
Hálózat tranziens viselkedésének vizsgálata 2.



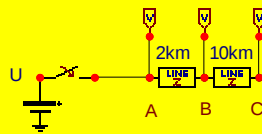
Hálózat tranziens viselkedésének vizsgálata 3.



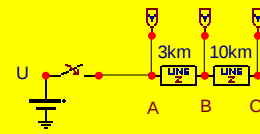
A vezetékhozz és a hullámellenállás egyidejű változtatásának hatása a diszkontinuitási pontok feszültségére



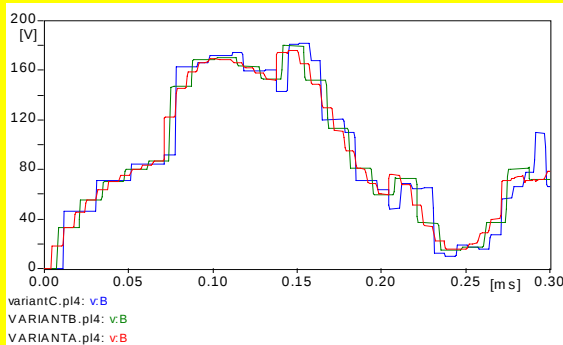
$$Z_{AB}=500 \text{ ohm}$$



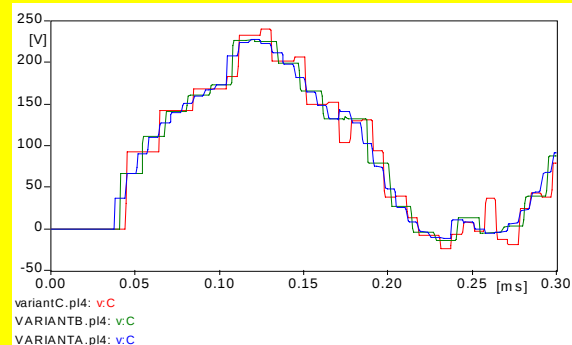
$$Z_{AB}=250 \text{ ohm}$$



$$Z_{AB}=167 \text{ ohm}$$



Feszültségek B pontban



feszültségek C pontban

Referencia kapcsolások néhány alkalmazási területe

- Bonyolult hálózatok tranziensei fizikájának megértése,
- A tranziens lefolyásának és hatásainak, a hálózat kritikus helyzeteinek előzetes becslése, üzemzavar-analízis.
- A tranziens lefolyását alapvetően meghatározó paraméterek kiválasztása: érzékenységi analízis.
- Pontos gépi számítás-sorozatok paraméter-intervallumának meghatározása, a számítások eredményeinek ellenőrzése.
- Esettanulmányok eredményeinek általánosítása, generalizáló koordinátarendszerek felépítése.
- Csatlakozó-, illetve háttér-hálózatok modelljeinek egyszerűsítése.
- Egységesebb kép kialakítása villamos hálózatokban lezajló hullámfizikai, valamint áramköri tranziens folyamatokról.

Veszteségek hatása a hullámterjedésre 1.

Egy $y=vt$ hosszúságú vezetékszakaszon áthaladó, u nagyságú feszültség hullám által a vezetékszakasz kapacitásába betáplált energia:

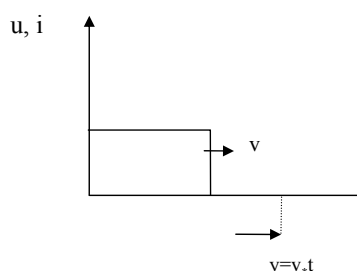
$$W_C = \frac{1}{2} C' y u^2 = \frac{1}{2} C' u^2 vt,$$

a betáplált töltőteltjesítmény $P_C = \frac{dW_C}{dt} = \frac{1}{2} C' u^2 v$

A hullám energiatartalmát csökkenti a vezetékszakasz G levezetése.

A veszteség: $P_G = G' y u^2$

$$u = u_0 e^{-\frac{G'y}{C'v}} = u_0 e^{-\frac{G't}{C'}}$$



Veszteségek hatása a hullámterjedésre 2.

Az áramhullámnak a vezetékszakaszon való áthaladása azt jelenti, hogy a vezetékszakasz finoman elosztott, soros induktivitásában áram indul meg, amely mágneses energiát közöl az adott szakasszal. A betáplált energia: $W_L = \frac{1}{2} L' y i^2 = \frac{1}{2} L' i^2 vt$.

Az ennek megfelelő teljesítmény: $P_L = \frac{dW_L}{dt} = \frac{1}{2} L' i^2 v$

A soros veszteség: $P_R = R' y i^2$

$$i = i_0 e^{-\frac{R'y}{L'v}} = i_0 e^{-\frac{R't}{L'}}$$

$$u = u_0 e^{-\frac{G'y}{C'v}} = u_0 e^{-\frac{G't}{C'}}$$

Veszteségek hatása a hullámterjedésre 3.

A kitevők azonosságának feltétele $\frac{L'}{C'} = \frac{R'}{G'} = Z^2 = \frac{u^2}{i^2}$

Ebből $u^2 G' = i^2 R'$

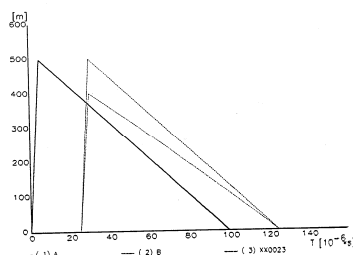
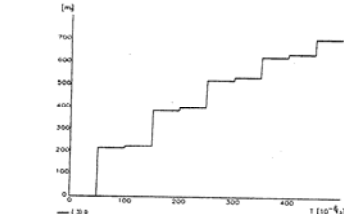
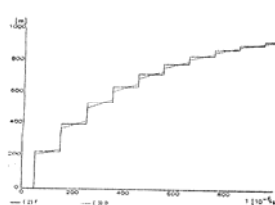
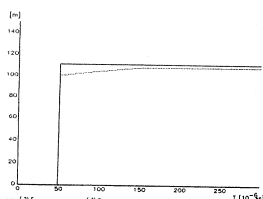
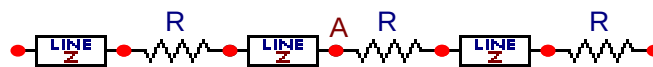
Ennek a feltételnek megfelelő vezetéket torzításmentesnek nevezik. Hasonló feltétel adódik a hullámimpedancia komplex kifejezéséből is:

$$Z = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \sqrt{\frac{\frac{R'}{L'} + j\omega}{\frac{G'}{C'} + j\omega}}$$

A fenti egyenletben ugyanis $R'/L' = G'/C'$ esetén a hullámellenállás ohmos, ettől eltérő esetekben pedig frekvenciafüggő.

Veszteségek hatása a hullámterjedésre 4.

A vezetősodrony ellenállása és a szigetelők levezetése

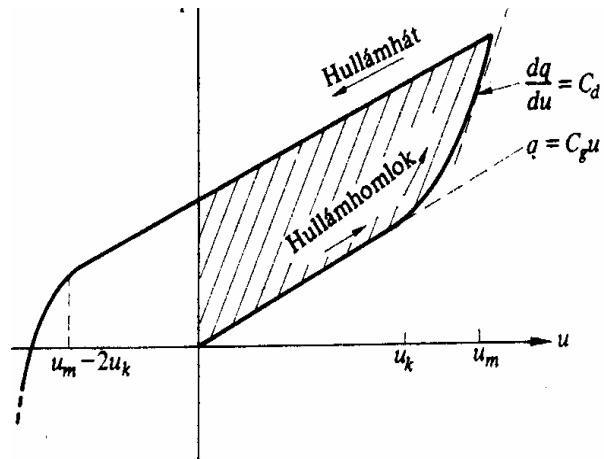


Veszteségek hatása a hullámterjedésre 5. A sugárzás hullámtorzító hatása

$$\frac{di}{dy} = C \frac{du}{dt} = \frac{dq}{dt}$$

$$q = C_g u + q_{kb}$$

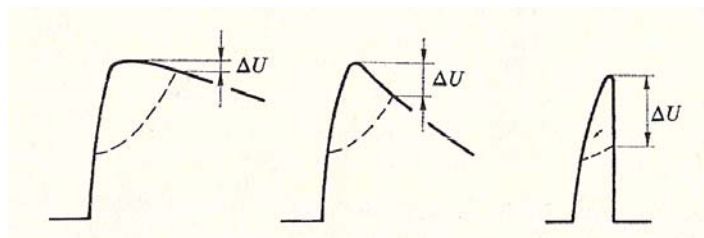
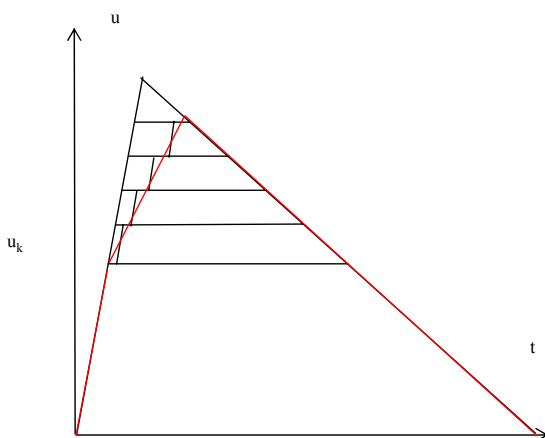
$$\frac{di}{dy} = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{du} * \frac{du}{dt}$$



dq/du kapacitás dimenziójú, ezért dinamikus kapacitásnak nevezik (C_d). Eszerint a küszöbfeszültségnél magasabb feszültség szinten

$$C_d = \frac{dq}{du} = C_g + \frac{dq_{kb}}{du} > C_g$$

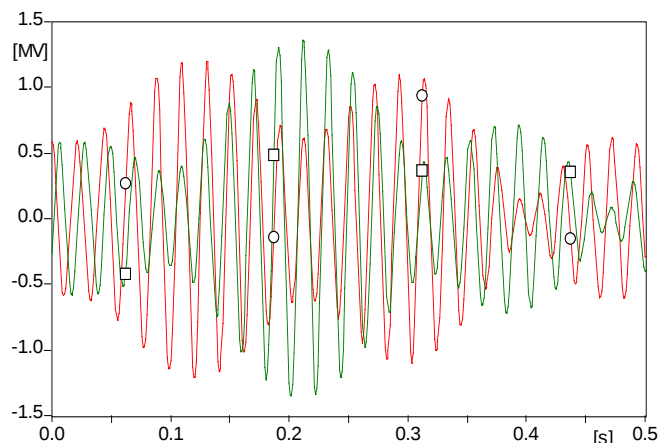
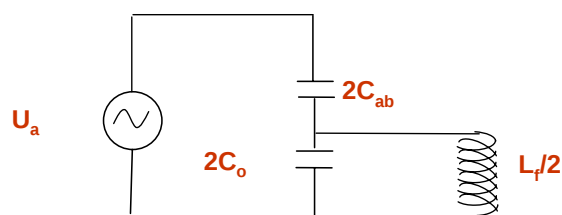
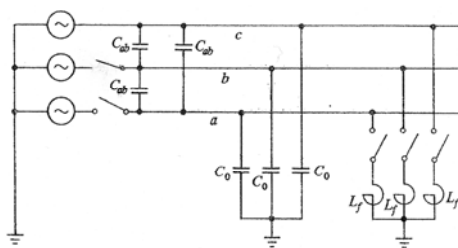
Veszteségek hatása a hullámterjedésre 6. A sugárzás hullámtorzító hatása



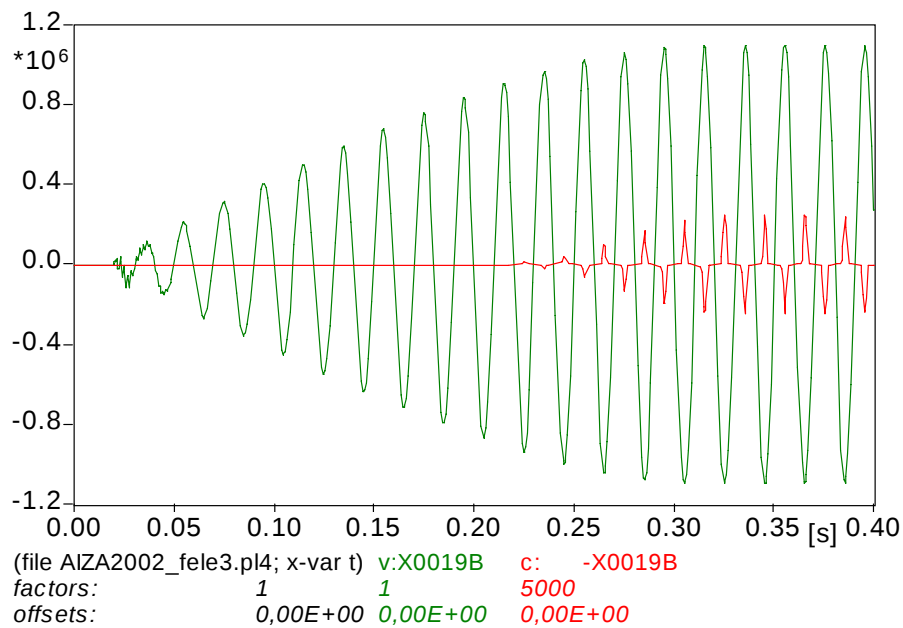
A sugárzás hatásai a hullámfolyamatokra

- A sugárzás feszültségfüggően csökkenti a vezeték hullámellenállását.
- A sugárzás feszültségfüggően csökkenti a hullám terjedési sebességét. Ezért a hullám homlokát torzítja.
- A hullámalaktól függően csökkenti a hullám csúcsértékét.
- A koronaburok létrejötte, vagyis a kezdeti feszültség erősen függ a sodrony állapotától és az időjárástól.
- Ezért nem könnyű feladat a tranziensek számításánál a sugárzást tekintetbe venni.

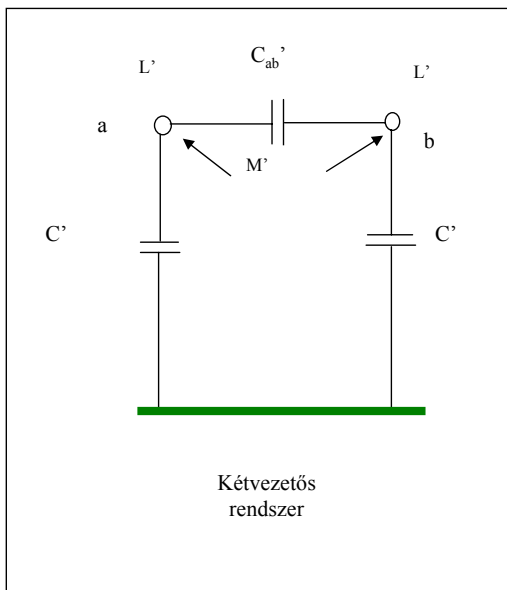
Forming resonance overvoltages when two phases are disconnected



Limitation of resonance TOV by MOV



Hullámterjedés kétvezetős rendszerben 1



$$-\frac{\partial u_a}{\partial y} = L' \frac{\partial i_a}{\partial t} + M' \frac{\partial i_b}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i_a}{\partial y} = C' \frac{\partial u_a}{\partial t} + C_{ab}' \frac{\partial (u_a - u_b)}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial u_b}{\partial y} = M' \frac{\partial i_a}{\partial t} + L' \frac{\partial i_b}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i_b}{\partial y} = C' \frac{\partial u_b}{\partial t} + C_{ab}' \frac{\partial (u_b - u_a)}{\partial t}$$

Az áramokat a differenciál-egyenletekből kiküszöbölve mind az idő, mind a hely függvényében két, második deriváltakat tartalmazó differenciálegyenletet kapunk.

Hullámterjedés kétvezetős rendszerben 2.

Feltételezzük, hogy a feszültségállapotokat itt is hullámterjedés hozza létre, vagyis a megoldás $u=f(t-y/v)$ alakú. Ezt a feltételezett megoldást a két differenciálegyenletbe helyettesítve és azokat megoldva kapjuk:

$$f_b\left(t - \frac{y}{v}\right) = \frac{1-rv^2}{sv^2} f_a\left(t - \frac{y}{v}\right) \quad f_b\left(t - \frac{y}{v}\right) = \frac{sv^2}{1-rv^2} f_a\left(t - \frac{y}{v}\right)$$

$$s=M'(C'+C_{ab}')-L'C_{ab}' \quad \text{és} \quad r=L'(C'+C_{ab}')-M'C_{ab}'$$

A fenti egyenletek csupán akkor lehetnek igazak, ha $\frac{1-rv^2}{sv^2} = \pm 1$

$$\text{Ebből} \quad v_{1,2,3,4} = \pm \frac{1}{\sqrt{r \pm s}}$$

Hullámterjedés kétvezetős rendszerben 3.

A hullámpárok sebességbeli különbsége megszűnik, vagyis a hullámpárok száma kettőre csökken, ha $s=0$. Ez az előzők alapján azt jelenti, hogy

$$s=M'(C'+C_{ab}')-L'C_{ab}'=0$$

$$\frac{M'}{L'} = \frac{C_{ab}'}{C'+C_{ab}'}$$

Ha a hullámsebességek képletébe beírjuk r és s értékét, az eredmény:

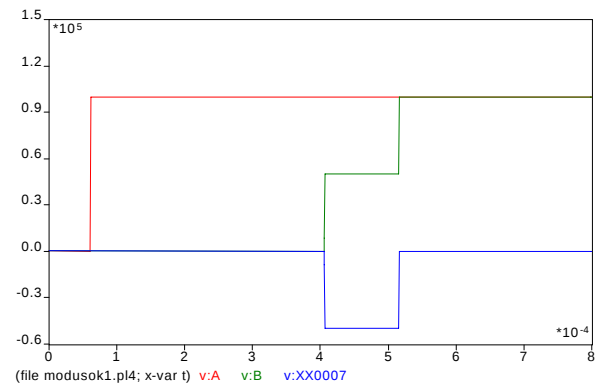
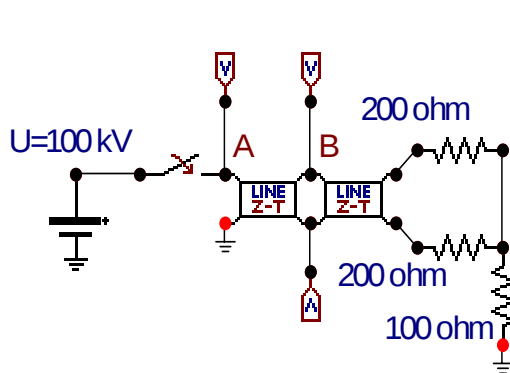
$$v_{1,2} = \pm \frac{1}{\sqrt{C'(L'+M')}} \quad v_{3,4} = \pm \frac{1}{\sqrt{(C+2C_{ab}')(L'-M')}}$$

A fázisfeszültségek modális hullámokra bomlása (példák)

A távvezeték *a* fázisára 100 kV-os egyenfeszültséget kapcsolunk, a másik fázisát földeljük a rákapcsolás helyén.

$$u_a = U = u_0 + u_1 \quad u_b = 0 = u_0 - u_1$$

$$\text{ebből } u_0 = \frac{1}{2}U, \quad u_1 = \frac{1}{2}U$$



A fázisfeszültségek modális hullámokra bomlása (példák)

- U feszültséget kapcsolunk *a* és *b* fázisvezető közé:

$$u_a = U/2 = u_0 + u_1$$

$$u_b = -U/2 = u_0 - u_1$$
 Ebből $u_0 = 0$; $u_1 = U/2$
- Azonos pillanatban mindkét fázisvezetőre a földhöz képest azonos U feszültséget kapcsolunk:

$$u_a = U = u_0 + u_1$$

$$u_b = U = u_0 - u_1$$
 Ebből $u_0 = U$, $u_1 = 0$
- A vezeték *a* fázisvezetőjére $2U$ feszültséget kapcsolunk, *b* fázisvezetőre pedig U feszültséget.

$$u_a = 2U = u_0 + u_1$$

$$u_b = U = u_0 - u_1$$
 Ebből $u_0 = 3U/2$, $u_1 = U/2$

Hullámellenállások többvezetős rendszerben

- Megállapítandó, hogy valamely fázisvezető bemeneti impedanciáját milyen mértékben változtatja meg egy másik, vele parallel haladó fázisvezető.
- Meg kell határozni a modális hullámellenállásokat, segítségükkel a modális feszültség-hullámokból kiszámíthatjuk a modális áramhullámokat

$$u_a = i_a Z_{aa} + i_b Z_{ab}$$

$$u_b = i_a Z_{ab} + i_b Z_{bb}$$

$$Z_{aa} = 138 \lg \frac{2h_a}{r_a}$$

$$Z_{ab} = 138 \lg \frac{f_{ab}}{g_{ab}}$$

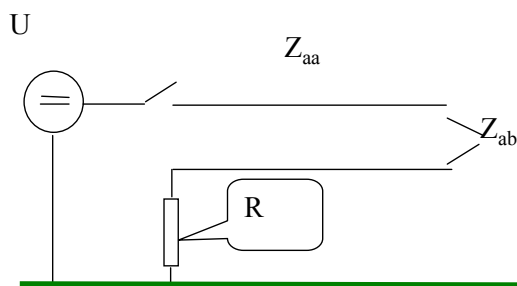
h_a – a fázisvezető föld feletti magassága,

r_a – a sodrony sugara,

f_{ab} – a fázisvezetőnek b fázisvezető tükörképétől mért távolsága,

g_{ab} – a két fázisvezető közötti távolság.

Hullámellenállások többvezetős rendszerben (példa)



$$u_a = U = i_a Z_{aa} + i_b Z_{ab}$$

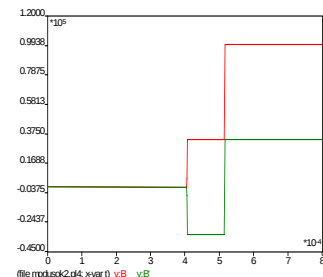
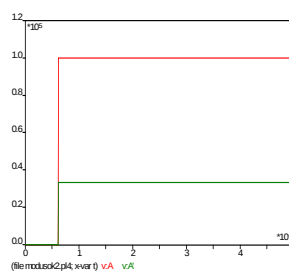
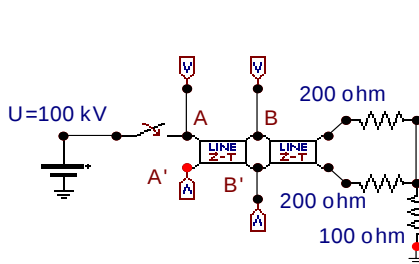
$$u_b = -i_b R = i_a Z_{ab} + i_b Z_{bb}$$

$$Z_a = \frac{U}{i_a} = Z_{aa} - \frac{Z_{ab}^2}{Z_{bb} + R}$$

Hullámellenállások többvezetős rendszerben (példa)

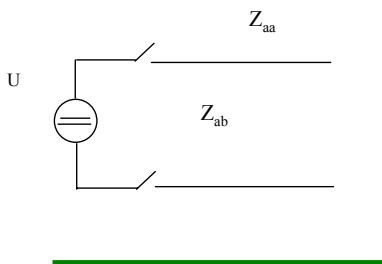
- $u_a = U = i_a Z_{aa}$
- $u_b = i_a Z_{ab}$
- A nyitott fázisvezető jelenléte a bemenő hullámellenállást nem befolyásolja

$$u_b = \frac{Z_{ab}}{Z_{aa}} u_a$$



Modális hullámellenállások

vezető modus:

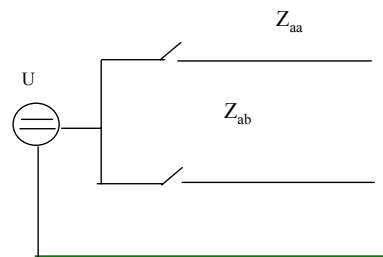


$$\begin{aligned} U/2 &= i_a Z_{aa} + i_b Z_{ab} \\ -U/2 &= i_a Z_{ab} + i_b Z_{bb} \end{aligned}$$

$$Z_1 = \frac{U}{i_a} = Z_{aa} - Z_{ab}$$

Fentiek szerint $Z_{aa} = \frac{1}{2}(Z_1 + Z_0)$ és $Z_{ab} = \frac{1}{2}(Z_0 - Z_1)$.

föld modus:



$$\begin{aligned} U &= i_a Z_{aa} + i_b Z_{ab} \\ U &= i_a Z_{ab} + i_b Z_{bb} \end{aligned}$$

$$Z_0 = U/i_a = Z_{aa} + Z_{ab}$$

Kétvezetős, szimmetrikus,
végtelen hosszúnak tekinthető
vezeték a fázisára 120kV
egyenfeszültséget
kapcsolunk, majd rövid idő után
kikapcsoljuk.

b fázisvezető vége a
rákapcsolás helyén nyitott.
 $Z_{aa} = 300 \text{ ohm}$, $Z_{ab} = 100 \text{ ohm}$

$$u_b = 120/300 = 40 \text{ kV}$$

$$Z_1 = Z_{aa} - Z_{ab} = 200 \text{ ohm}$$

$$Z_0 = Z_{aa} + Z_{ab} = 400 \text{ ohm.}$$

Modális fesz.hullámok:

$$U_a = 120 \text{ kV} = u_1 + u_0$$

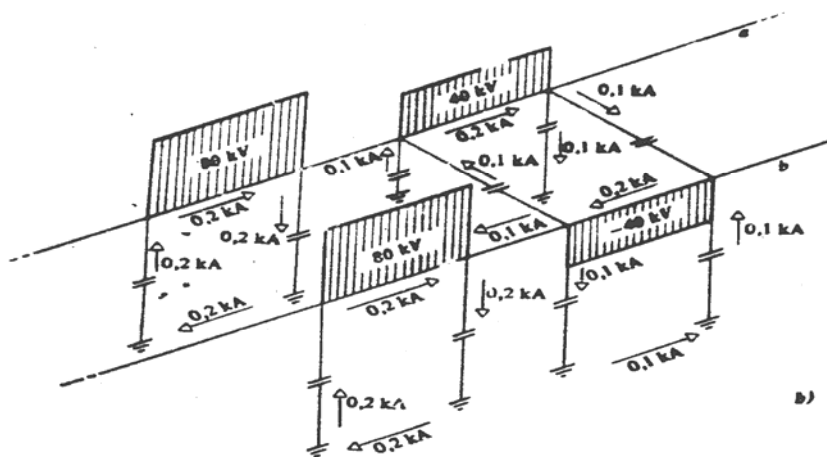
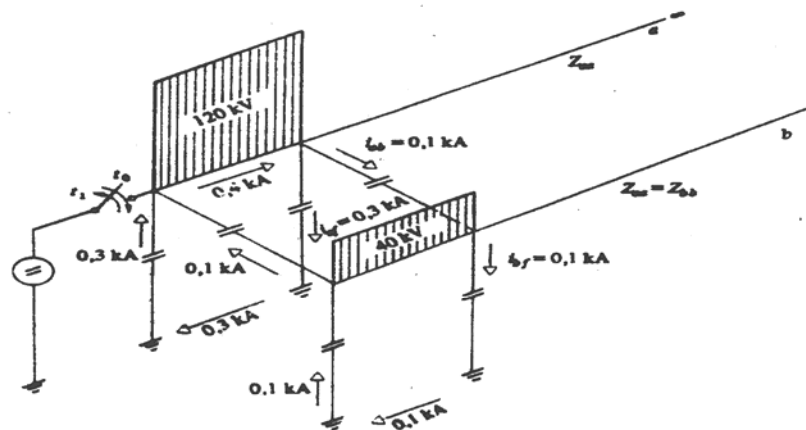
$$U_b = 40 \text{ kV} = -u_1 + u_0$$

$$u_1 = 40 \text{ kV} \text{ és } u_0 = 80 \text{ kV}$$

Modális áramhullámok:

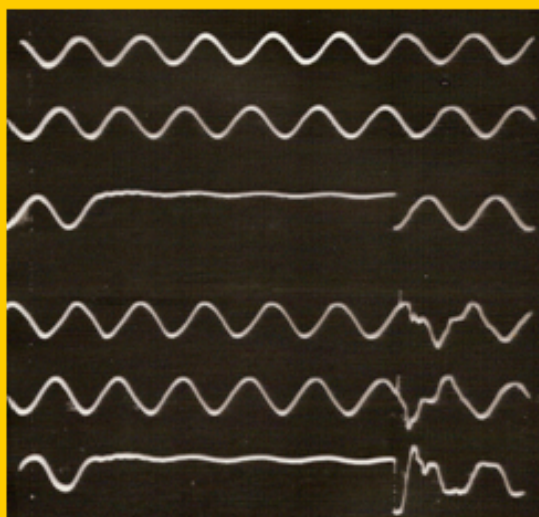
$$i_0 = u_0/Z_0 = 0.2 \text{ kA és}$$

$$i_1 = u_1/Z_1 = 0.2 \text{ kA}$$

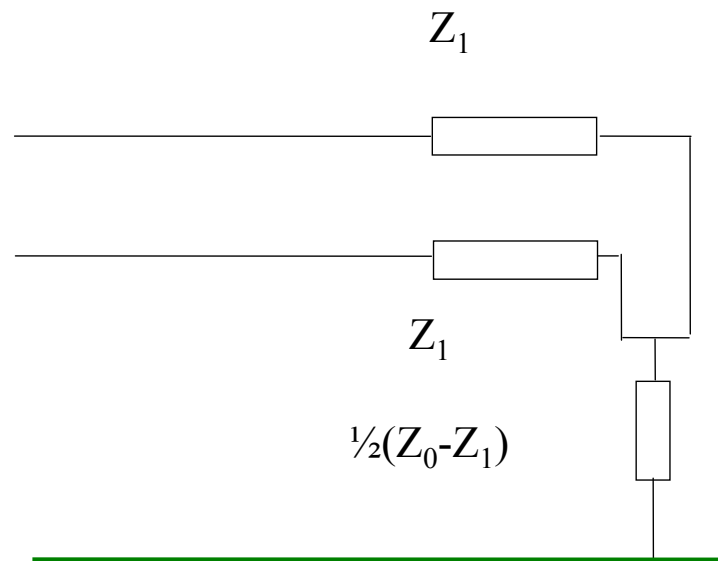


Modusok

Téves (zárlat nélküli) egyfázisú visszakapcsolás



Kétfázisú vezeték „végtelenítése”



Hullámterjedés n vezetős rendszerben 1.

mátrix-differenciálegyenletek:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \underline{u}}{\partial y} &= \underline{L}' \frac{\partial \underline{i}}{\partial t} + \underline{R}' \underline{i} \\ -\frac{\partial \underline{i}}{\partial y} &= \underline{C}' \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \underline{G}' \underline{u} \end{aligned}$$

Fourier transzformált:

$$\begin{aligned} -\frac{d\underline{U}}{dy} &= \underline{Z}'(\omega) \underline{I} \\ -\frac{\partial \underline{I}}{\partial y} &= \underline{Y}'(\omega) \underline{U} \end{aligned}$$

$$\underline{Z}'(\omega) = \underline{R}'(\omega) + j\omega \underline{L}'(\omega)$$

$$\underline{Y}'(\omega) = \underline{G}'(\omega) + j\omega \underline{C}'(\omega)$$

Hullámterjedés n vezetős rendszerben 2.

$$-\frac{d^2 \underline{U}}{dy^2} = \underline{\underline{Z'(\omega)Y'(\omega)}} \underline{U}$$

A megoldást vándorhullám formában feltételezzük

$$-\frac{d^2 \underline{I}}{dy^2} = \underline{\underline{Y'(\omega)Z'(\omega)}} \underline{I}$$

$$\underline{U} = e^{-\underline{\lambda}_u y} \underline{A} \quad \underline{I} = e^{-\underline{\lambda}_i y} \underline{B}$$

terjedési együttható mátrixok:

$$\underline{\lambda}_u = \sqrt{\underline{\underline{Z'(\omega)Y'(\omega)}}} \quad \underline{\lambda}_i = \sqrt{\underline{\underline{Y'(\omega)Z'(\omega)}}}$$

Hullámterjedés n vezetős rendszerben 3.

- Meghatározzuk a hullámterjedés módját leíró terjedési együttható mátrix saját vektorait, mert ezekre alkalmazva a mátrix transzformációt, a tárgyvektorral arányos képvektor adódik, vagyis csupán a főátlóban lesznek zérustól különböző elemek.
- Ha tehát a tranziens keletkezési helyén fellépő fázisfeszültségeket és -áramokat a terjedési együttható saját vektorai irányába eső komponensekben (modusokban) fejezzük ki, akkor ezek a komponensek csatolásmentes hullámpályákon futnak, **az egyes modusokban a terjedési sebesség és a csillapítás független a többi modusban lezajló folyamattól.**

Hullámterjedés három-vezetős rendszerben 4.

- Ha $\underline{u}_0$ fázisfeszültség-vektort az $y=0$ helyen a saját vektorok irányába eső komponensekre bontjuk:
- $\underline{u}_0 = u_{01}\underline{s}_1 + u_{02}\underline{s}_2 + u_{03}\underline{s}_3$
- akkor egy távolabbi, y helyen a feszültségvektor kifejezése:
- $\underline{u}_y = u_{01}e^{-\lambda_1 y}\underline{s}_1 + u_{02}e^{-\lambda_2 y}\underline{s}_2 + u_{03}e^{-\lambda_3 y}\underline{s}_3$

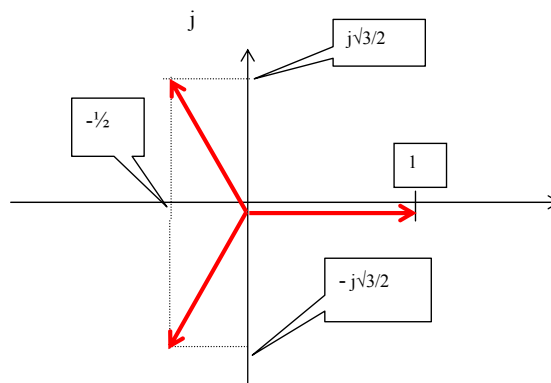
A három sajátvektor irányába eső komponensekre bontott, aszimmetrikus feszültségrendszer minden egyes komponensének eszerint saját terjedési együtthatója van: saját (modális) terjedési sebessége és csillapítása.

Modális komponensrendszerek 1.

A terjedési együttható mátrix karakterisztikus egyenletének több megoldása van.

Az egyik az alábbi sajátvektorokat adja:

$$\underline{s}_1[1, 1, 1]; \quad \underline{s}_2[1, -\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}; -\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}]; \quad \underline{s}_3[1, -\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}; -\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}]$$

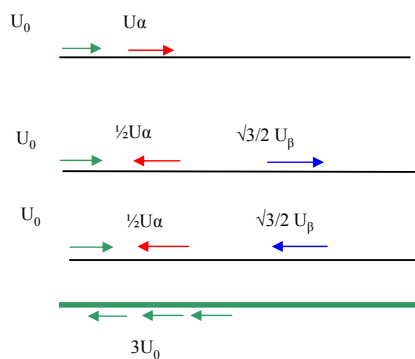


Modális komponensrendszerek 2.

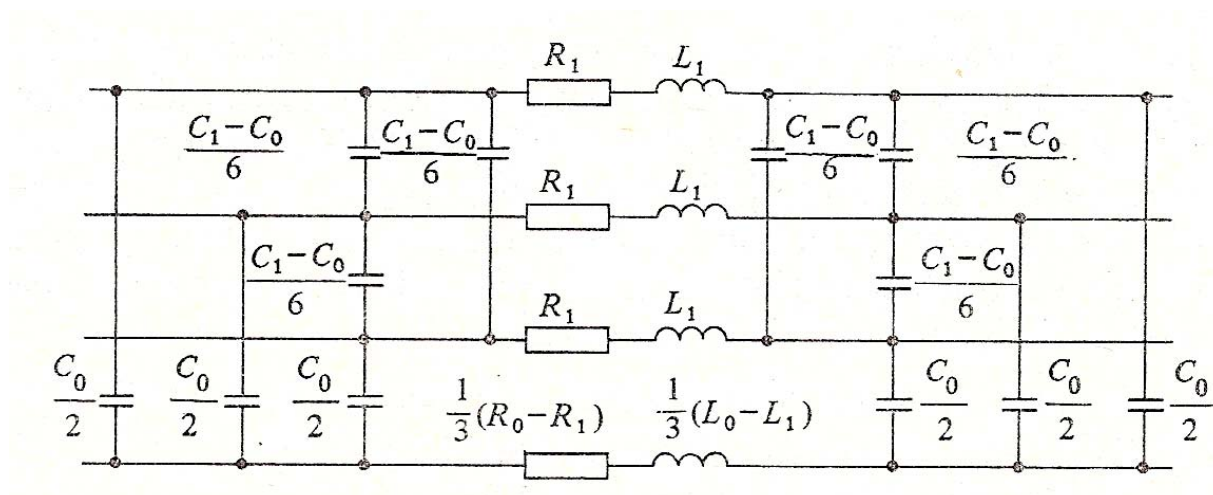
A másik megoldás a következő sajátvektorokat eredményezi:

$$s_1[1,1,1]=U; \quad s_2[1, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}]; \quad s_3[0, \frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}]$$

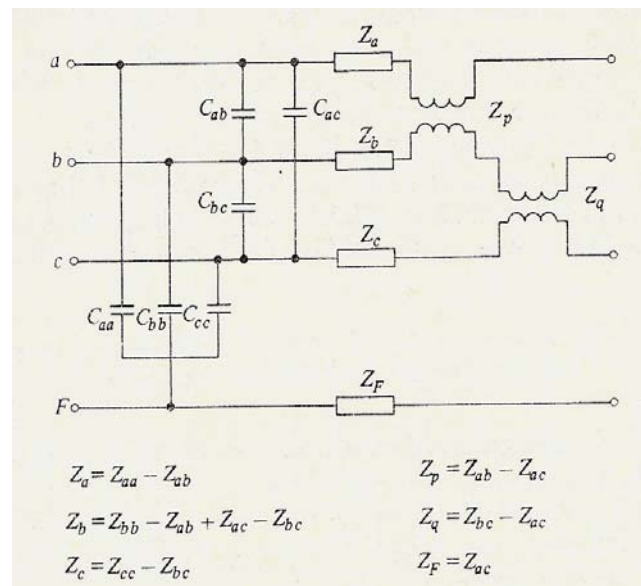
Ezek a sajátvektorok az $\alpha, \beta, 0$ komponensrendszert írják le, amely komplex mennyiséget (forgatást) nem tartalmaz



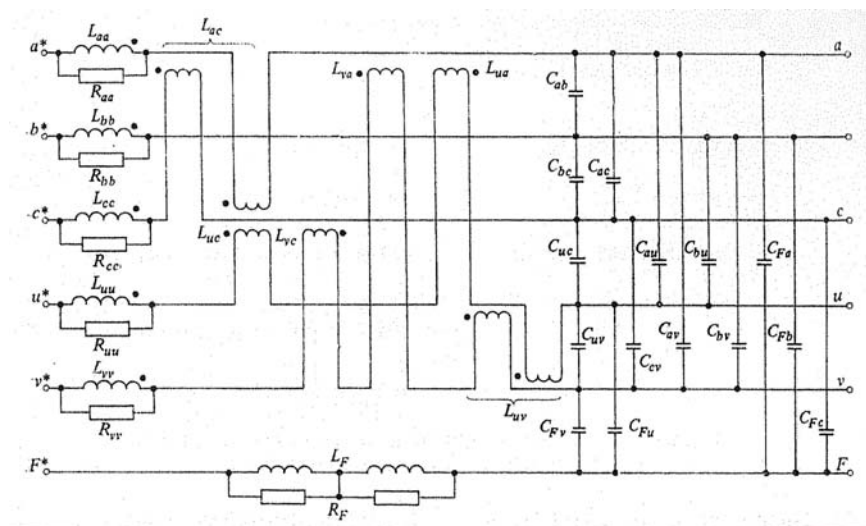
Háromfázisú szimmetrikus vezeték modelljének egyik Π tagja



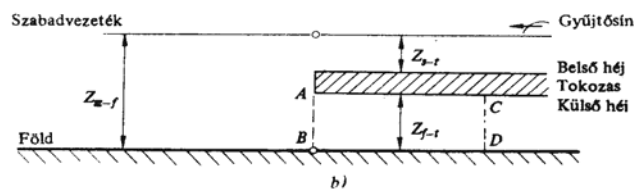
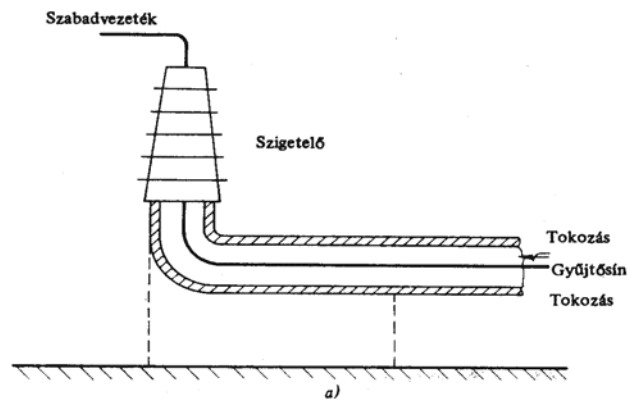
Háromfázisú aszimmetrikus vezeték modelljének egyik Γ tagja



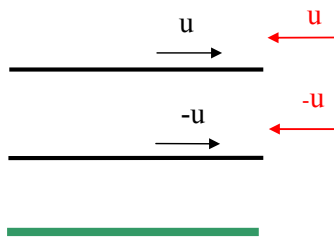
Háromfázisú két védővezetős aszimmetrikus vezeték modelljének egyik Γ tagja



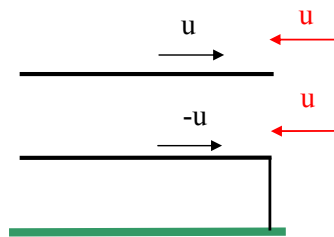
Modusok gázszigetelésű vezetékben



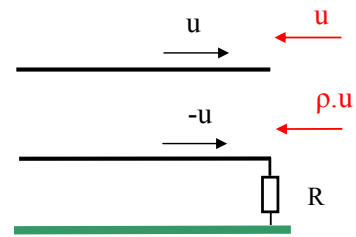
Különböző jellegű diszkontinuitási pontokról reflektált modális hullámok



Vezető modulusú
beérkező hullámpár,
vezető modulusú
viszavert hullámpár



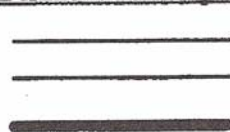
Vezető modulusú
beérkező hullámpár,
föld modulusú visszavert
hullámpár



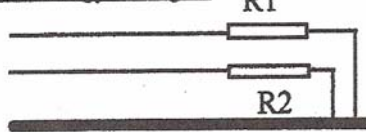
Vezető modulusú beérkező
hullámpár,
mindkét modulusban
viszavert hullámpár

Diszkontinuitási pont változatai többvezetős hálózaton

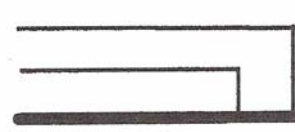
Diszkontinuitási pont a vezeték egyik végén:



szimmetrikus



szimmetrikus, ha $R_1 = R_2$
kvázi-szimmetrikus, ha $R_1 > Z_{aa}$
és $R_2 > Z_{aa}$, vagy $R_1 < Z_{aa}$ és $R_2 < Z_{aa}$
(ha ρ_a és ρ_b előjele azonos)

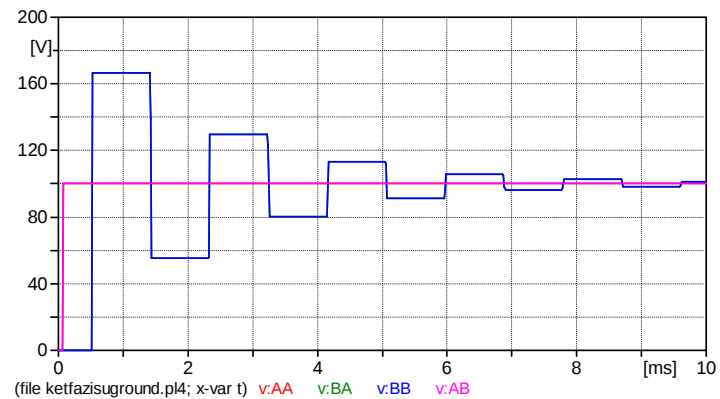
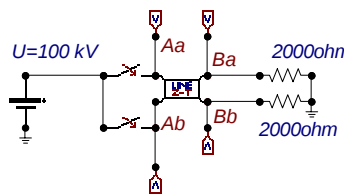


szimmetrikus

Variánsok:

- A- egy modulusban jelenik meg hullámpár, a diszkontinuitási pontok szimmetrikusak
- B- egy modulusban jelenik meg hullámpár, a diszkontinuitási pontok kvázi-szimmetrikusak
- C- mindkét modulusban megjelenik hullámpár, a diszkontinuitási pontok szimmetrikusak
- D- mindkét modulusban megjelenik hullámpár, a diszkontinuitási pontok kvázi-szimmetrikusak.
- E- a hálózat aszimmetrikus diszkontinuitási pontot tartalmaz.

Föld modulusú feszültség rákapcsolása szimmetrikus végponti állapotú vezetékre (A variáns)

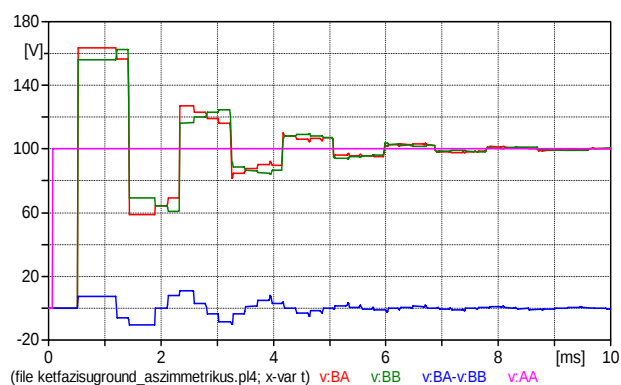
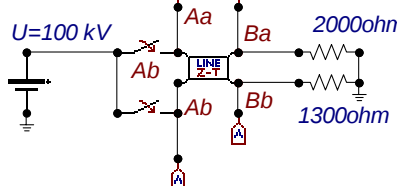


U_1 , vagyis a vezető modulusú
más néven: vonali feszültség
 $=0$

U_0 , vagyis föld modulusú, más néven
fázisfeszültségek

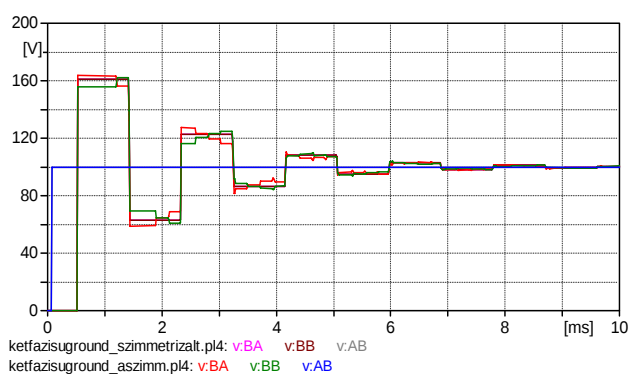
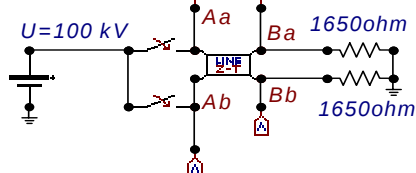
Visszavezethető ideális egy vezető-föld rendszerre, ahol $T=T_0$, $v=v_0$ és $R=R_0$.

Föld modulusú feszültség rákapcsolása kvázi-szimmetrikus végponti állapotú vezetékre (B variáns)

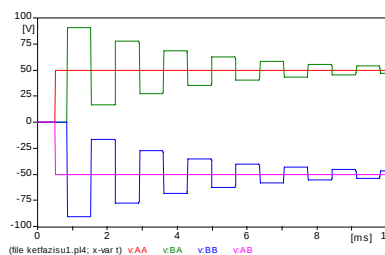
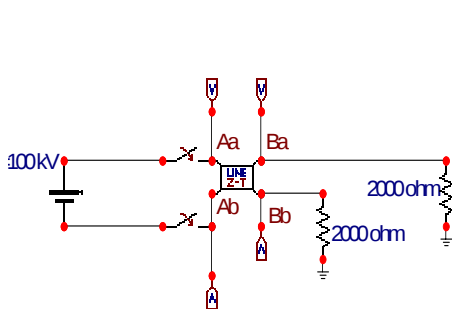


Föld modulusú és vezető modulusú feszültségek

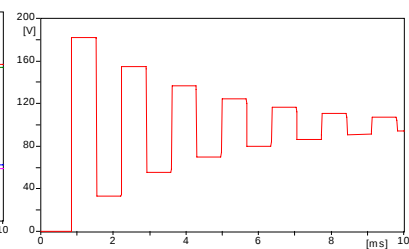
Szimmetrizálva:



Vezető modulusú feszültség rákapcsolása szimmetrikus végponti állapotú vezetékre (A variáns)

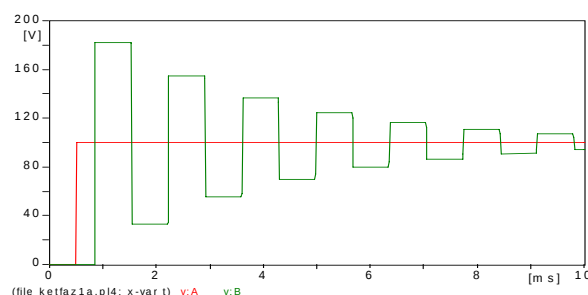
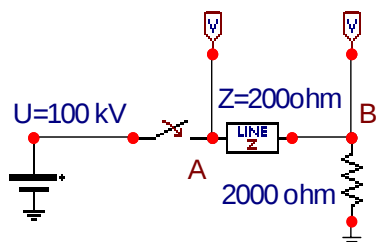


Fázisfeszültségek

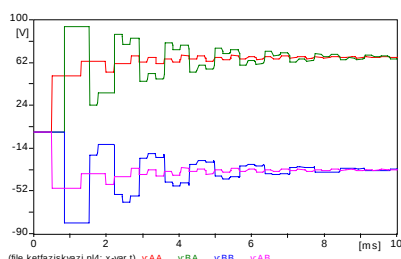
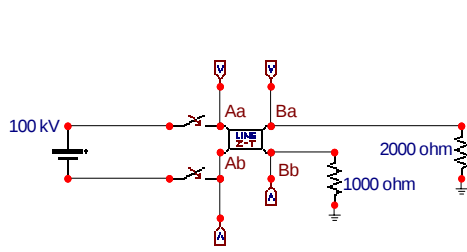


vezető modulusú feszültség

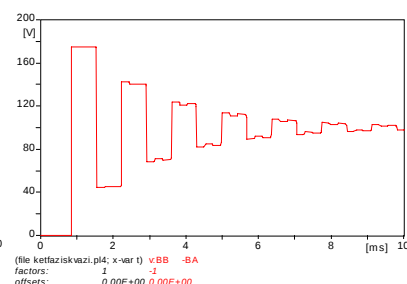
Visszavezethető ideális egy vezető-föld rendszerre, ahol $T=T_1$, $v=v_1$ és $R=R_1$.



Vezető modulusú feszültség rákapcsolása kváziszimmetrikus reflexiós pontot tartalmazó hálózatra (B variáns)

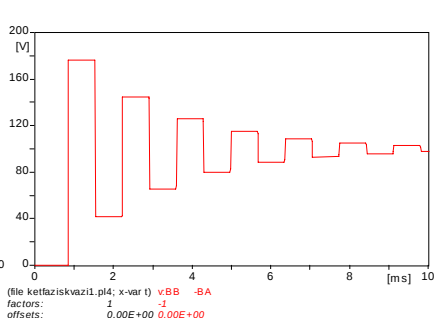
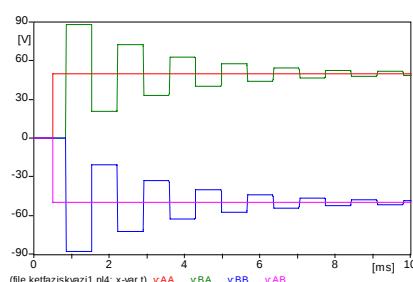
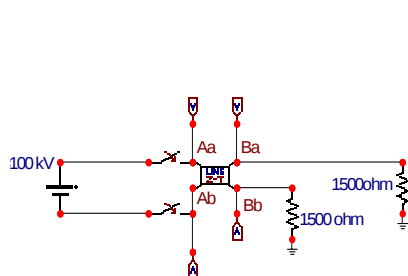


Fázisfeszültségek A és B pontban

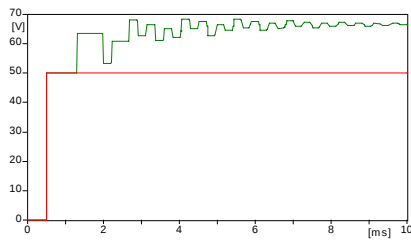


Vonalí feszültség B pontban

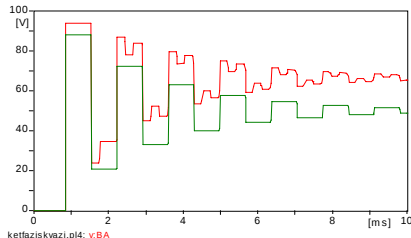
Szimmetrizálva a reflexiós pontokat az alábbi módon:



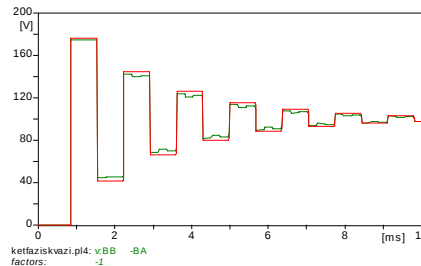
A szimmetrizálás hatásának illusztrálása



Fázisfeszültségek
szimmetrizálás nélkül és
szimmetrizálással A
pontban



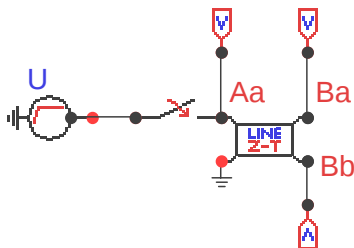
Fázisfeszültségek
szimmetrizálás nélkül és
szimmetrizálással B
pontban.



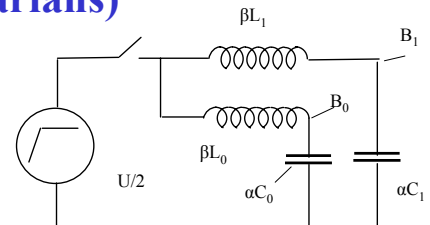
Vonali feszültség
szimmetrizálás nélkül és
szimmetrizálással B
pontban

ÉRDEMES MEGFIGYELNI A FÖLD MODUS MEGJELENÉSÉT A FÁZISFESZÜLTSEGEKBEN: A DOMINÁNS VEZETŐ MODUSBAN AZ ELTÉRÉS KICSI!

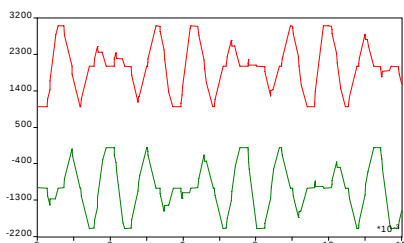
A modális tranziensek különválása (C variáns)



Szimmetrikus hálózat,
aszimmetrikus hullámpár

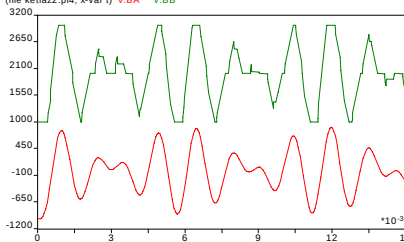
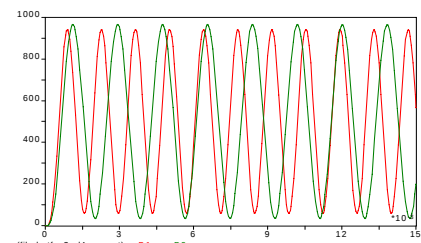


Modális referencia-kapcsolások



← fázisfeszültségek
a vezeték **Ba** és
Bb pontján

modális lengések a
referenciakör **B1** és
B0 pontjaiban



a fázis feszültsége B vezetékvégen

felső (zöld) görbe: a hálózaton, alsó (piros) görbe: a referenciakörben

$u_{B0} + u_{B1}$

$u_{B0} - u_{B1}$

b fázis feszültsége B vezetékvégen

A modális rezgőkörök paramétereinek számítása

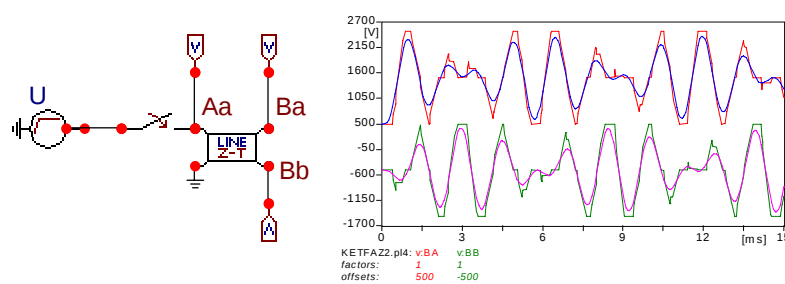
Vezetékadatok: $Z_1=200\text{ ohm}$, $l=100\text{ km}$, $v_1=290\text{ km/ms}$, $T_1=0.345\text{ ms}$
 $Z_0=400\text{ ohm}$, $v_0=220\text{ km/ms}$, $T_0=0.455\text{ ms}$

Fentiekből számítva:

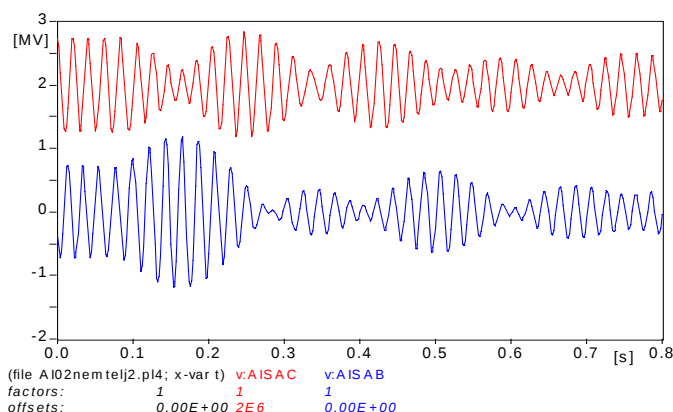
$$L_1=Z_1T_1=69\text{ mH}, C_1=T_1/Z_1=1.725\text{ }\mu\text{F},$$
$$L_0=T_0Z_0=182\text{ mH}, C_0=T_0/Z_0=1.138\text{ }\mu\text{F}$$

A referencia - rezgőkörök paramétereinek szorzói mindkét modulusban:
 $\alpha=0.81$, $\beta=0.5$.

A vezető, illetve föld modulusban különváltan lezajló tranziensek (szimmetrikus reflexiós pontokat tartalmazó hálózat)



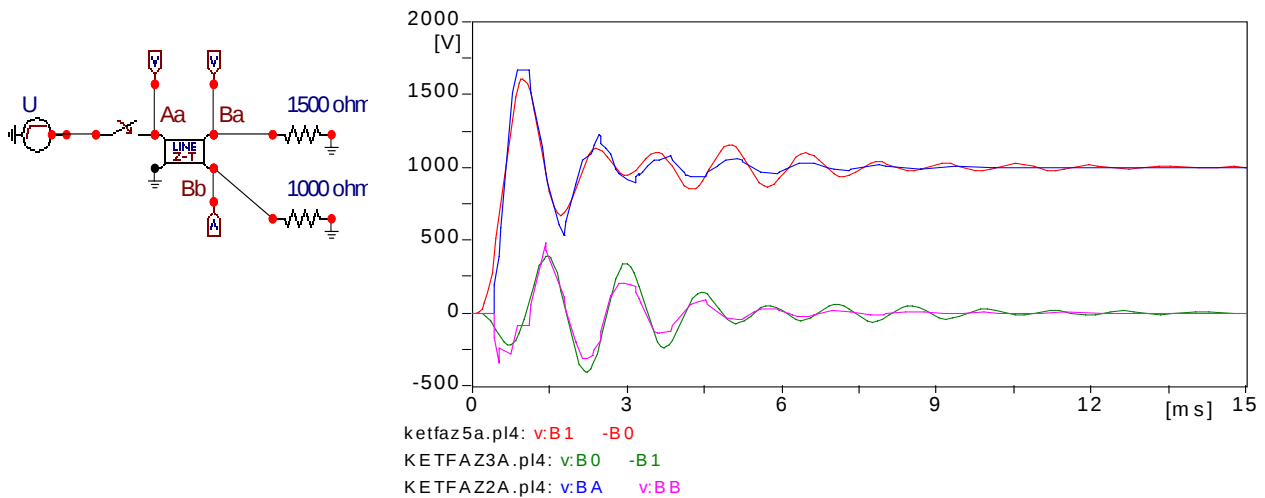
B ponti feszültségek a hálózaton és a modális referencia-rezgőkörökből számítva



Két fázis kikapcsolása okozta tranziens 479 km hosszú, söntkompenzált távvezetéken.

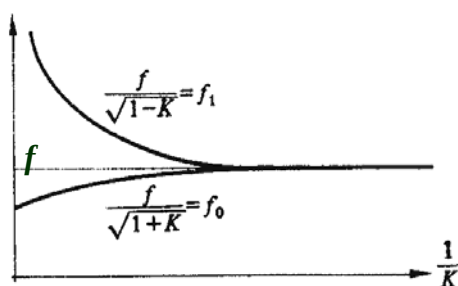
A kikapcsolt fázisok feszültségének alakulása Albertirsa alállomásban.

A vezető, illetve föld modulusban különváltan lezajló tranziensek (egy szimmetrikus és egy kvázi-szimmetrikus reflexiós pontot tartalmazó hálózat, D variáns)



B ponti feszültségek a hálózaton és a szimmetrizált
diszkontinuitási pontot feltételező referencia
kapcsolásokból számítva

A modális lengések frekvenciájának elemzése



Kiszámítva egy tipikus, 220 kV-os távvezeték fenti három sebességét, arányuk:

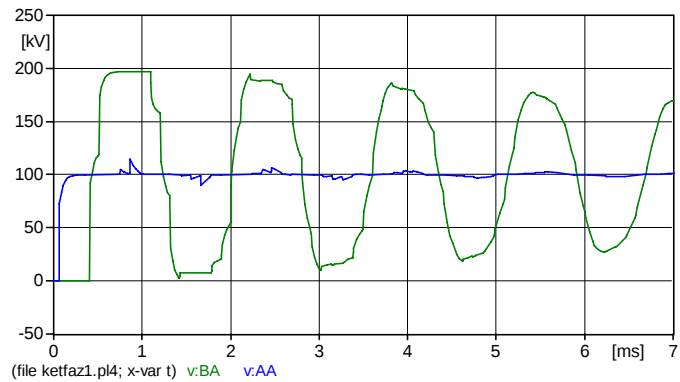
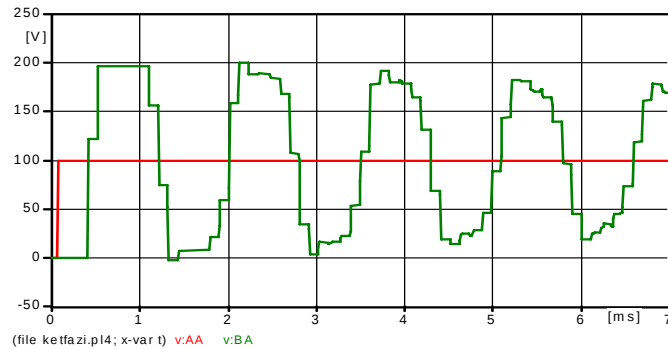
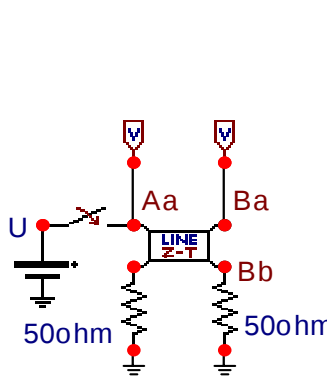
$$v_1:v:v_0=1,15:1:0,94.$$

A hullámsebesség és az ellentétes előjelű vezetékvégi reflexiós együtthatók következtében oszcilláló vezető lengési frekvenciája egyenesen arányos a sebességgel, mivel $f=1/4T=v/4l$.

A szóbanforgó vezeték tranzienseit jellemző három lengési frekvencia (f_1 , f és f_0) aránya megegyezik eszerint a sebességek fenti arányával. Felkeresve a fenti ábra diagramjának $1/K$ tengelyén azt az értéket, ahol $f_1/f=1,15/1$, az f/f_0 arányra $1/0,94$ adódik. Eszerint a fázisvezetőkön adott hálózati konfigurációkban kialakuló lengéskor a fázisvezetők csatolt rezgőköröknek tekinthetők, amiből két fontos fizikai következtetést vonhatunk le:

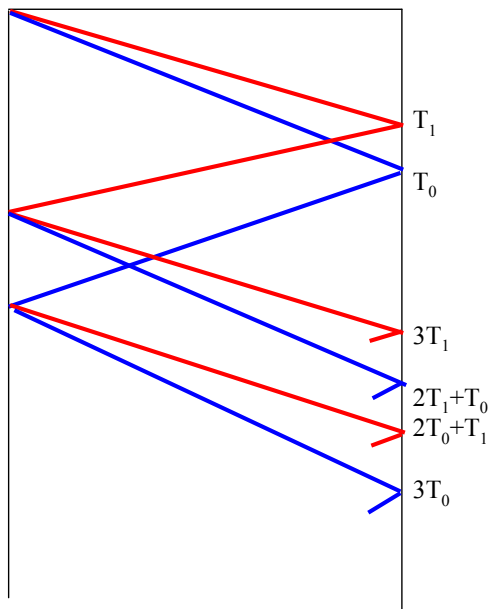
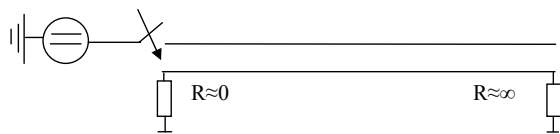
- A hullámfolyamatok referencia áramkörök jelenségeire való egyszerűsítése a tranziensek fizikai lényegét emeli ki.
- A modális sebességeknek új fizikai tartalmat adhatunk: v_1 és v_0 az egyenként v hullámsebességgel jellemezhető fázisvezetők erős csatolásakor kialakuló, két lengési frekvenciából visszaszámítható hullámsebességek.

Aszimmetrikus diszkontinuitási pontok 1. (E variáns)



Aszimmetrikus diszkontinuitási pont 2.

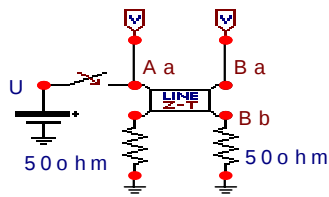
T_0 - föld módusú befutási idő



T_1 - vezető módusú befutási idő

A	B
0	T_1
$2T_1$	T_0
$2T_0$	$3T_1$
	$2T_1 + T_0$
	$2T_0 + T_1$
	$3T_0$
$4T_1$	$5T_1$
$2T_1 + 2T_0$	$4T_1 + T_0$
$2T_1 + 2T_0$	$3T_1 + 2T_0$
$4T_0$	$4T_1 + 2T_0$
	$2T_1 + 3T_0$
	$2T_1 + 3T_0$
	$4T_0 + T_1$
	$5T_0$
$6T_1$	$7T_1$
$4T_1 + 2T_0 \times 3$	$6T_1 + T_0$
$2T_1 + 4T_0 \times 2$	$5T_1 + 2T_0 \times 3$
$4T_0 + 2T_1$	$4T_1 + 3T_0 \times 3$
$6T_0$	$3T_1 + 4T_0 \times 3$
	$2T_1 + 5T_0 \times 3$
	$6T_1 + T_1$
	$7T_0$

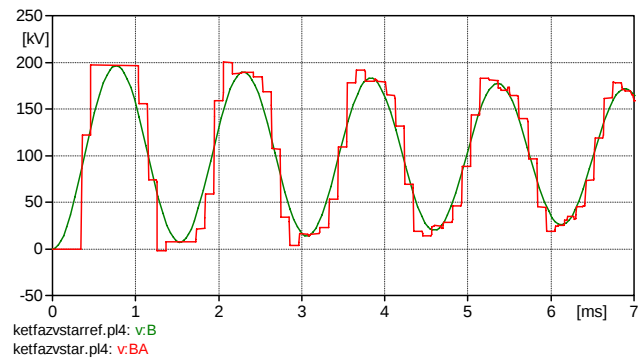
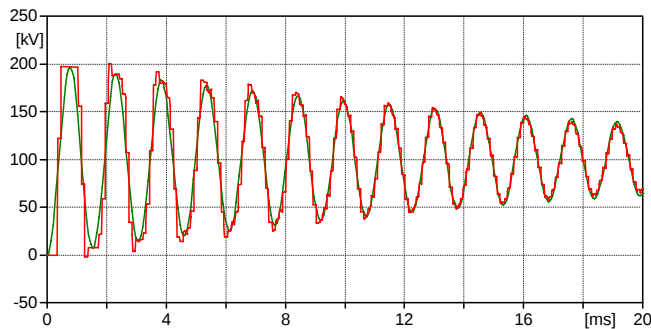
A v^* fiktív hullámsebesség fogalma



$$l = 100000 \text{ m}$$

$$v_1 = 290 \text{ m}/\mu\text{s}$$

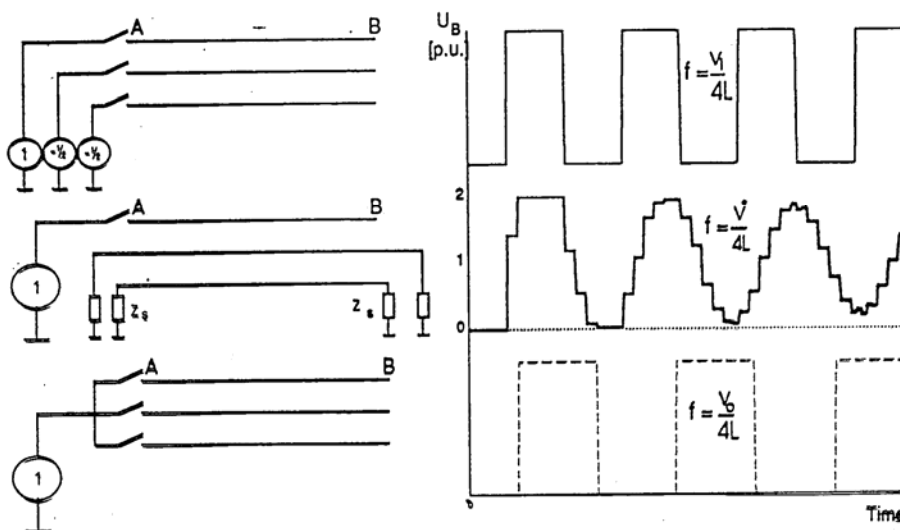
$$v_0 = 220 \text{ m}/\mu\text{s}$$



$$f^* = 1/4T^*; T^* = 384 \mu\text{s}; v^* = 100000/384 = 260.4 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Legalább egyik diszkontinuitási pont aszimmetrikus

Aszimmetrikus diszkontinuitási ponton a visszavert hullámok száma kétszerese lesz a beérkező módális hullámoknak: minden hullámpárból képződik egy vezető modusú és egy föld modusú hullámpár!



$$v < v^* < v_1$$

$$v^* = 4 L f^*$$

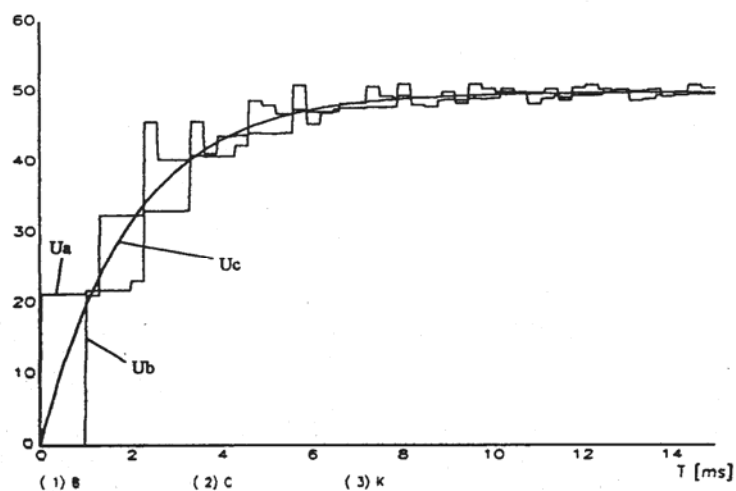
750 kV-os távvezeték szimulációján végzett kísérletek

Sor-szám	Kapcsolás	v^* , km/ms	Megjegyzés
1.	U_0 egyenfeszültség rákapcsolása a vezető – föld módusban	232	vezető – föld modus sebessége
2.	az U_0 egyenfeszültség rákapcsolása a vezető – vezető módusban	290	vezető – vezető modus sebessége
3.	b és c fázis mindkét vége nyitott	254	$v_{\min}^*$
4.	b fázis mindkét vége 0,4 H induktivitáson keresztül földelt, c fázis mindkét vége nyitott	255	
5.	b fázis mindkét vége $R = 500 \Omega$ -os ellenálláson át földelt, c fázis mindkét vége nyitott	258	
6.	b és c fázis mindkét vége 0,4 H induktivitáson keresztül földelt	260	
7.	b és c fázis A -oldali végpontja földelt, B -oldali végpontjukhoz hosszú vezeték csatlakozik	261	$\frac{v_1 + v_0}{2}$
8.	b fázis mindkét vége földelt, c fázis mindkét vége nyitott	263	
9.	b és c fázis mindkét vége földelt	272	$v_{\max}^*$

Aszimmetrikus diszkontinuitási pont 3.

- Amennyiben aszimmetrikus diszkontinuitási ponttal ellátott, többfázisú vezeték tranzienséről áttekintést, referenciát kívánunk kapni, a fentiek alapján úgy kell eljárunk, mint az egyvezetős rendszernél.
- Ki kell választani a vizsgált folyamatban aktív szerepet játszó fázisvezetőt és az arra jellemző hullámsebességet, valamint hullámellenállást a többi vezetőnek a földdel való kapcsolatától függően kell megválasztani.
- A tranziens áttekintése történhet az egyvezetős (egyszerűsített) modellen, vagy ezt referenciakörre tovább lehet egyszerűsíteni.
- A hullámimpedanciát az aktív fázisvezető Z_{aa} saját hullám-impedanciájához közeli értékre kell felvenni, ha a többi vezető nyitott, vagy nagy impedancián keresztül földelt és $(Z_{aa} - Z_{ab}^2/Z_{aa})$ -ra, ha a többi fázisvezető a földdel kis ellenállású kapcsolatban van.
- Az aktív vezetőt jellemző v^* hullámsebesség alsó határát (v) jól közelíti $v \approx \frac{1}{2}(v_1 + v_0)$, felső határa v_1 , a nem aktív fázisok földelési helyzetétől függően közelítjük nagyságát v -hez, illetve v_1 -hez.

Példa 1.



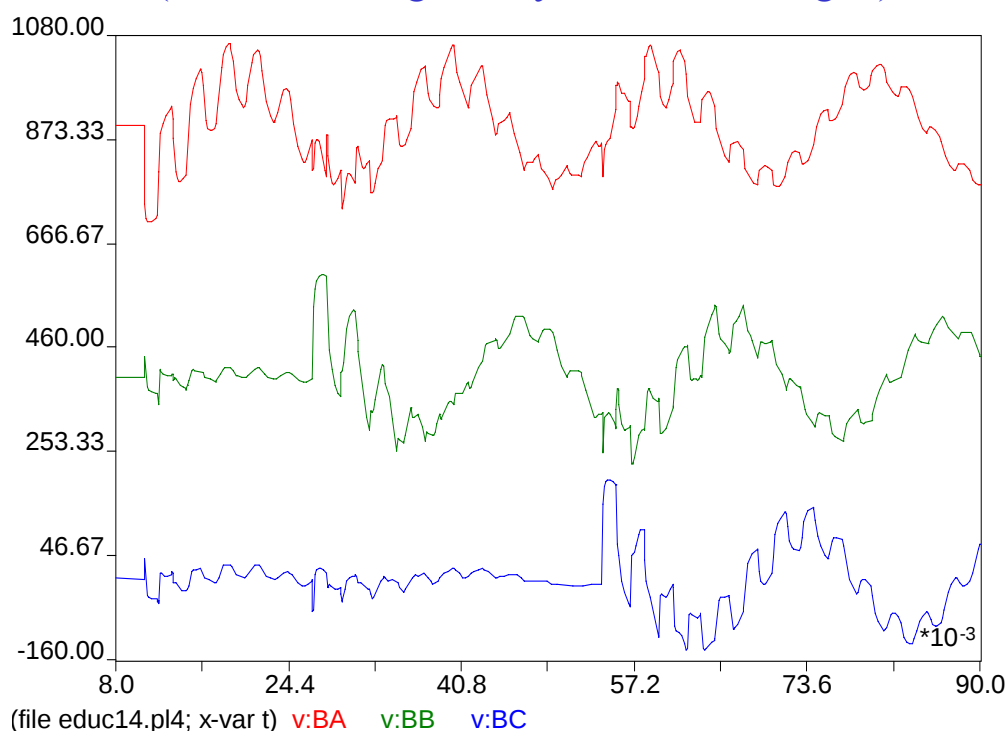
Feszültségek A fázis végein (a és b pontokban), valamint a referencia kör kondenzátorán.

$Z_{aa}=300$ ohm, $Z_{ab}=100$ ohm, $T_1=1$ ms, $T_o=1.3$ ms.

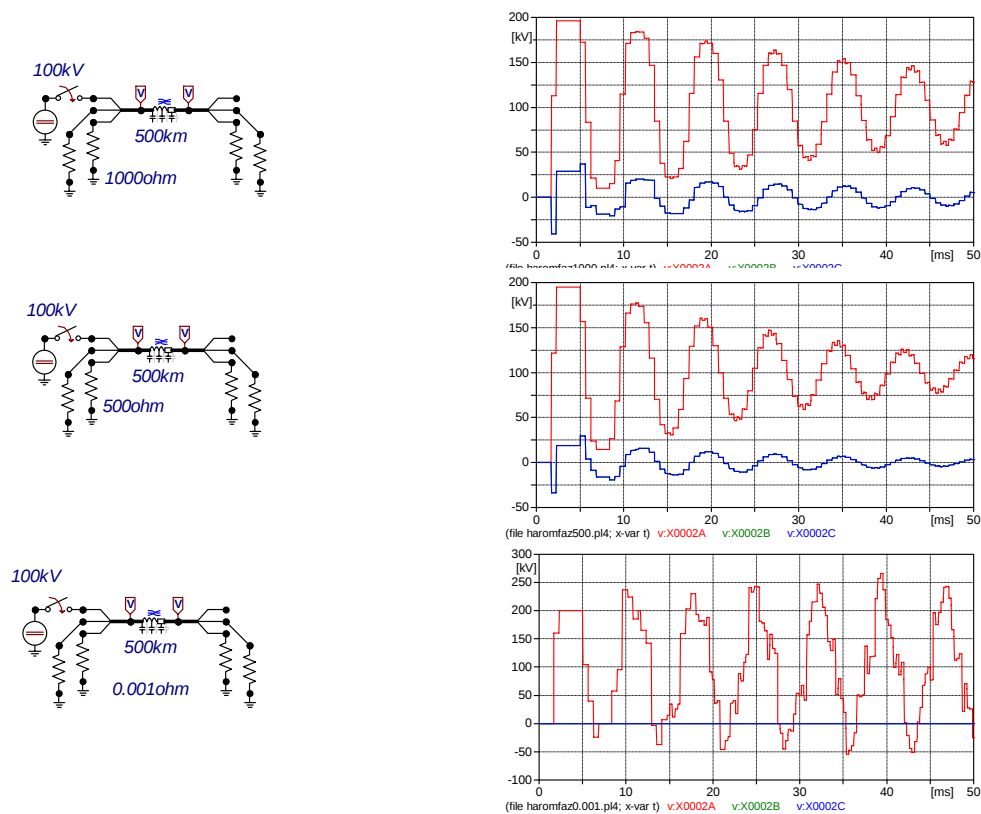
A fázis mindkét végén $R=1000$ ohmmal lezárt, B fázis mindkét végén rövidrezárt.

A referencia kapcsolás kondenzátorának kapacitása Z_{aa} -ból és $T=1/2(T_1+T_o)$ -ból számítva.

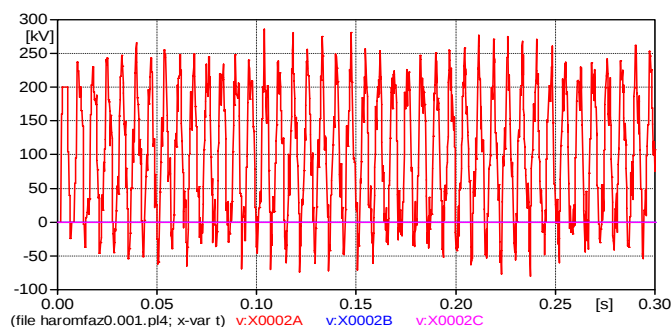
Példa 2: Háromfázisú távvezeték fázisonkénti, nem szimultán, $a - b - c$ fázissorrendű bekapcsolása (fázisfeszültségek a nyitott vezetékvégen)



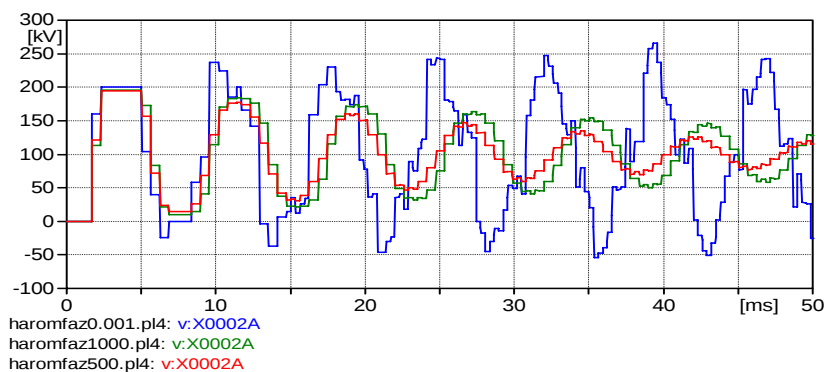
Aszimmetrikus diszkontinuitási pontok háromfázisú vezetéken 1.



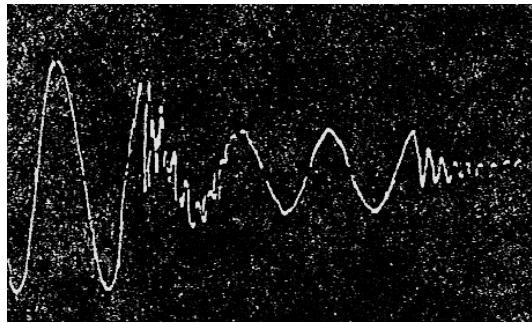
Aszimmetrikus diszkontinuitási pontok háromfázisú vezetéken 2.



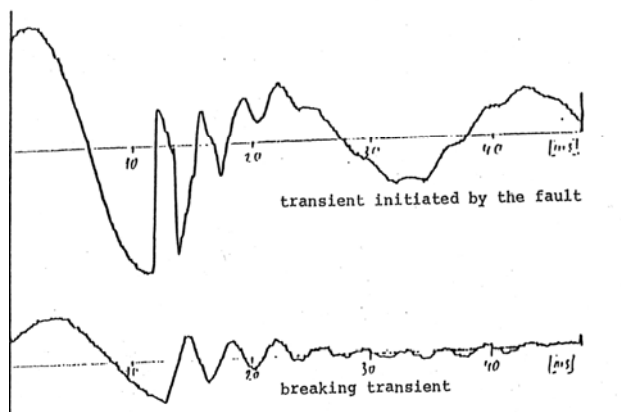
$$Z_1 = Z_{aa} - Z_{ab}^2 / Z_{aa}$$



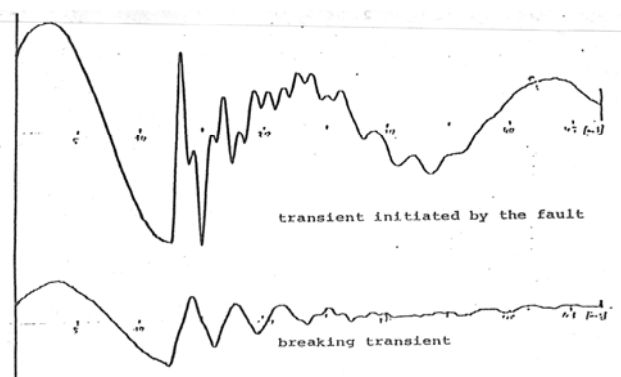
Zárlati és zárlat-kikapcsolási tranziens



Példa 3: FN zárlati távolságmérés tranziens analízissel 1.

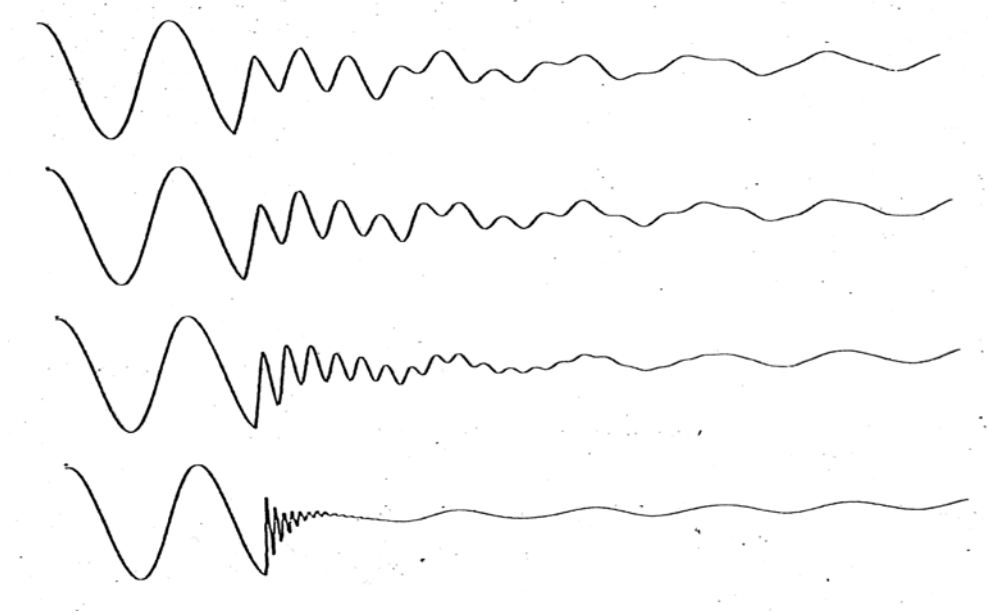


FN zárlati tranziens (az alállomásban mérve) és a zárlat megszakításának tranziense (a vonali megszakítónál mérve). Mérőeszköz: kapacitív osztó.



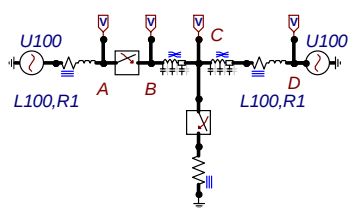
Mérőeszköz: induktív feszültségváltó

Példa 3: FN zárlati távolságmérés tranziens analízissel 2.

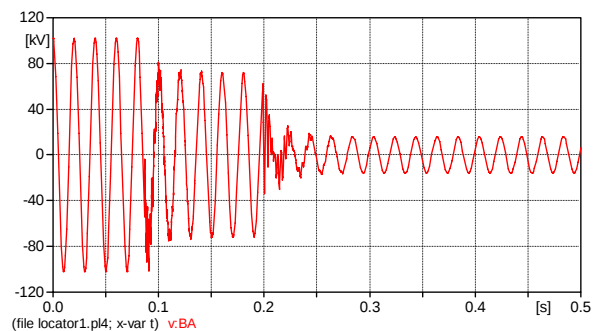


FN zárlat megszakítási tranziense különböző zárlati távolságoknál
(feszültség a vonali megszakító vezetékoldali kontaktusán)

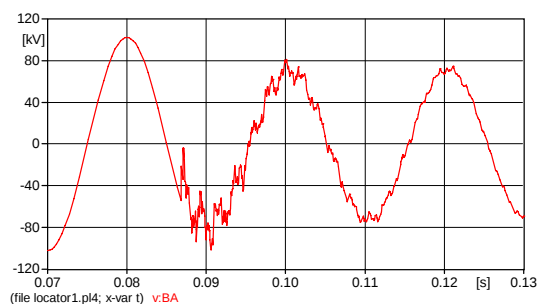
Példa a fiktív hullámsebességre alkalmazására alapozott távmérésre 1.



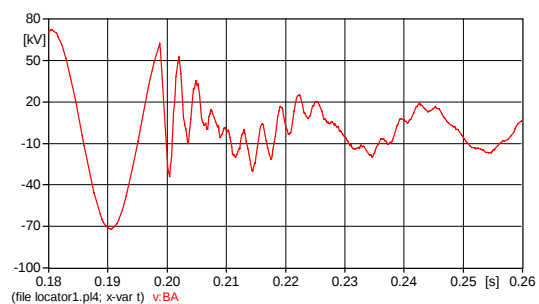
A távvezeték hossza: 250 km, a zárlat
helye B-től 200 km távolságra van.



Feszültség B ponton, a zárlatos fázisvezetőben



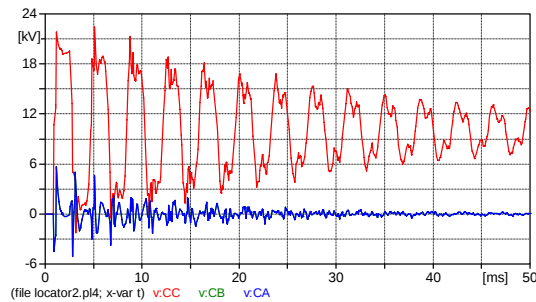
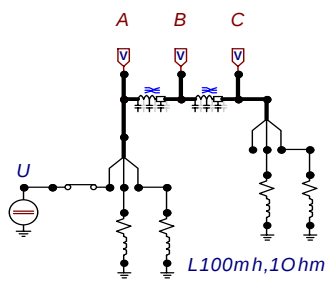
Zárlati tranziens: a háttérhálózat
miatt erősen torzított



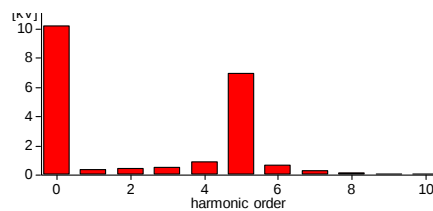
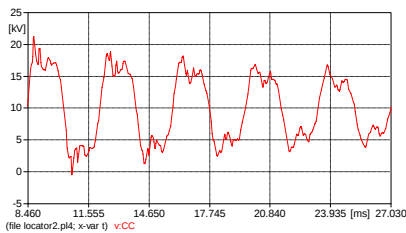
Megszakítási tranziens (távolsági
zárlat kikapcsolása)

Példa a fiktív hullámsebesség alkalmazására alapozott távmérésre 2.

A v^* sebesség meghatározása: az egyik fázisra (C) egyenfeszültséget kapcsolunk és a másik két fázist a háttérhálózatok impedanciáján keresztül földeljük.



Mintavétel a tranziens C feszültséggörbéjéből és harmonikus analízis :



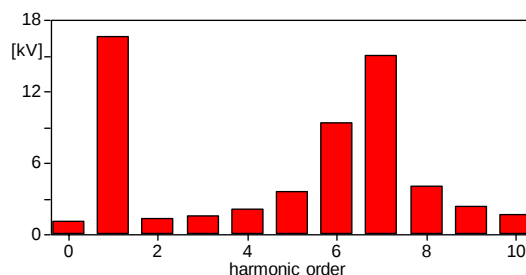
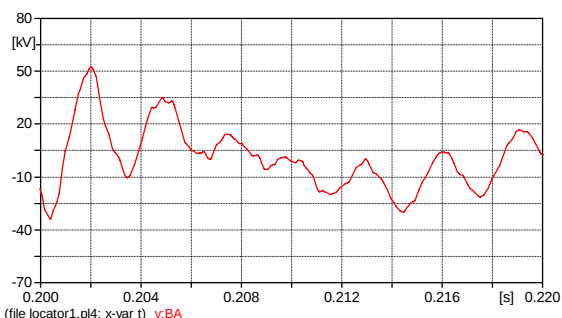
A lengés 5. felharmonikusa a 18.57 ms periódusidejű „alapharmonikusnak”, így $4T^* = 18.57/5 = 3.714$ ms. Ebből $T^* = 3.714$ ms/4 = 0.93 ms

A v^* sebesség értéke: $250 \text{ km}/0.93 \text{ ms} = 269 \text{ km/ms}$

(a vezeték modális sebességei: $v_1 = 300 \text{ km/ms}$ és $v_0 = 220 \text{ km/ms}$)

Példa a fiktív hullámsebesség alkalmazására alapozott távmérésre 3.

Mintavétel a kikapcsolási tranziens időfüggvényéből és harmonikus analízis



A kikapcsolási lengés az üzemi feszültség hatodik és hetedik felharmonikusa közé esik, pontosan a 6.7-ik. A kikapcsolási tranziens frekvenciája tehát $f_{ki} = 6.7 \times 50 = 335 \text{ Hz}$.

Így a kikapcsolási cancellation wave befutási ideje a kikapcsolás helyétől (B pont) a zárlat helyéig (C pont) $T_{cw} = 1/4f_{ki} = 1/4 \times 335 \text{ Hz} = 0.0007462 \text{ s} = 0.7462 \text{ ms} = 746.2 \mu\text{s}$

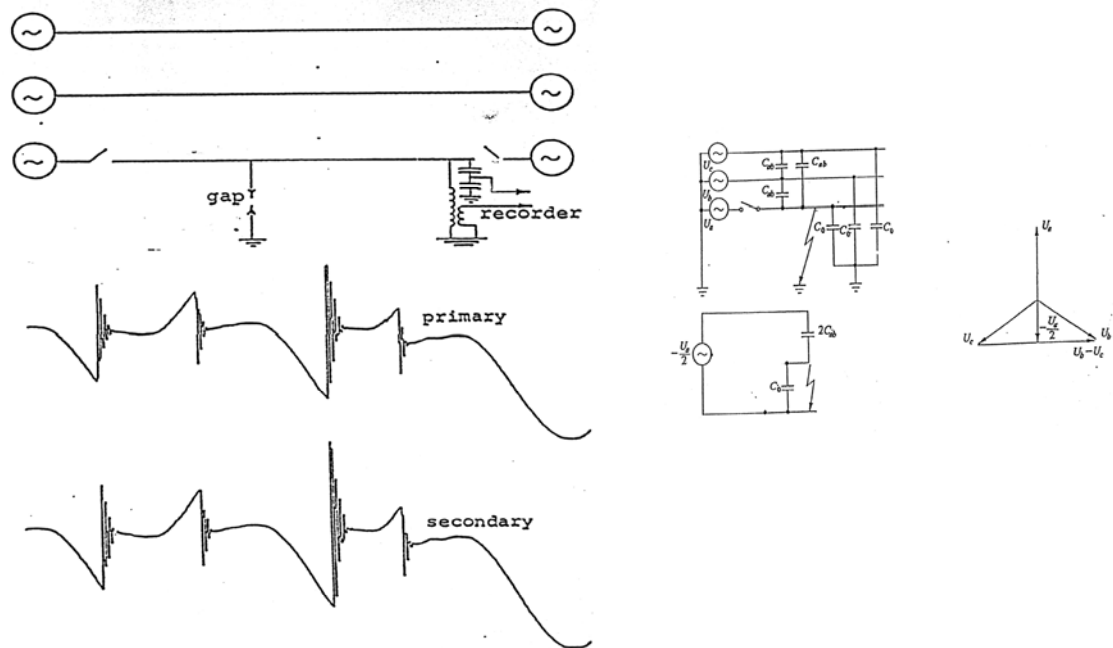
Következésképpen a megszakító és a zárlat helye közötti vezeték hossz:

$l_z = 0.7462 \text{ ms} \times 269 \text{ km/ms} = 200.728 \text{ km}$.

A példa szerinti hálózatban a zárlati vezeték hosszát 200 km-re állítottuk be. A mérési hiba 0.728 km, egy és két oszlop közötti, a valóságos távolság $0.728/200 = 3.64\%$ -e.

Példa 3: FN zárlati távolságmérés tranziens analízissal 3.

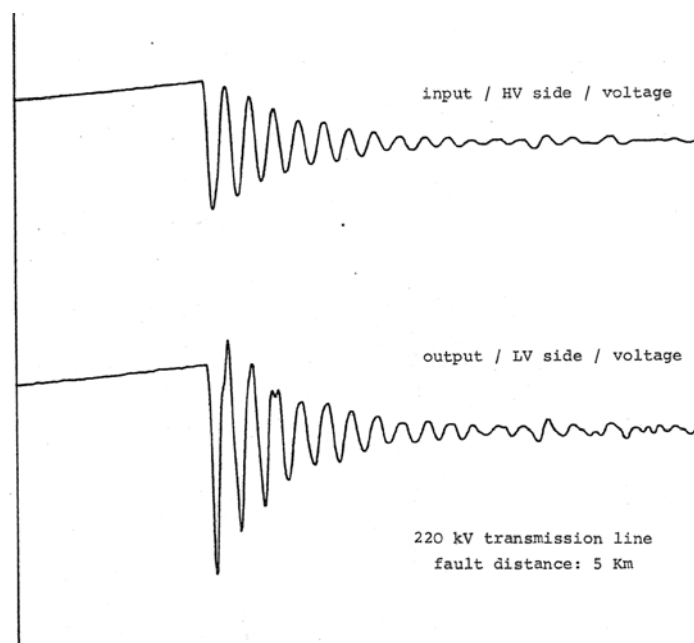
(kísérlet feszültségváltó tranziens átviteli pontosságának megállapítására)



Scheme and result of field tests for the investigation of the transient transfer of voltage transformers

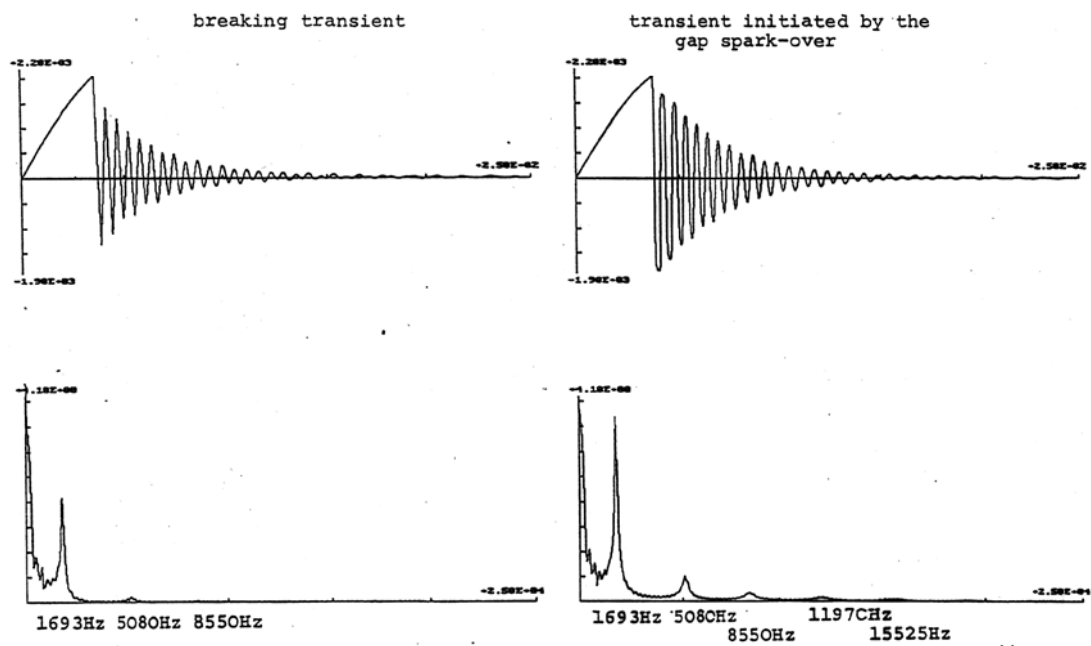
Példa 3: FN zárlati távolságmérés tranziens analízissal 4.

(kísérlet feszültségváltó tranziens átviteli pontosságának megállapítására)



Példa 3: FN zárlati távolságmérés tranziens analízissel 5.

(Kísérlet feszültségváltó tranziens átviteli pontosságának megállapítására)



A tantárgy felépítése

1. Ideális egy vezető föld rendszer
 - 1.1 A hullámterjedés törvényszerűségei ideális egy vezető – föld rendszerben
 - 1.2 Az elemi hullámok sorozatos reflexiója eredményeként keletkező tranziensek jellegzetességei és számítási módjai (Bergeron, Bewley, és tartozékaik)
 - 1.3 Referencia-kapcsolások célja és felépítése.
2. Sodrony- és koronaveszteség torzító hatása.
3. A veszteséges föld torzító hatása: hullámterjedés két, illetve n vezető rendszerben.
 - 3.1 Modusok kialakulása.
 - 3.2 Több vezető, reális rendszerben hullámfolyamatok eredményeképpen kialakuló tranziensek visszavezetése egy vezető-föld rendszer tranzienseire.
4. Tekercsekben lejátszódó tranziensek
5. Az egyfázisú visszakapcsolási ciklus tranziensei.
6. A csillagpontkezelés egyes válfajait jellemző fontosabb tranziensek.

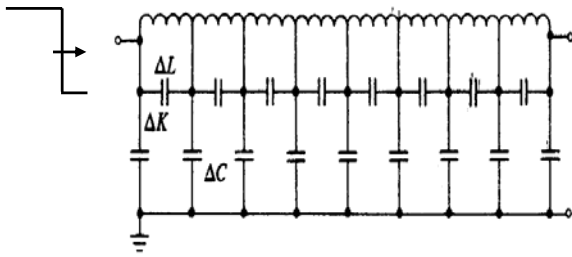
Tekercsekben lejátszódó tranziensek

Transzformátorok, feszültség- és áramváltók, generátorok és motorok, soros- és söntfojtók. Meghibásodásuk hosszú kiesési időket okozhat.

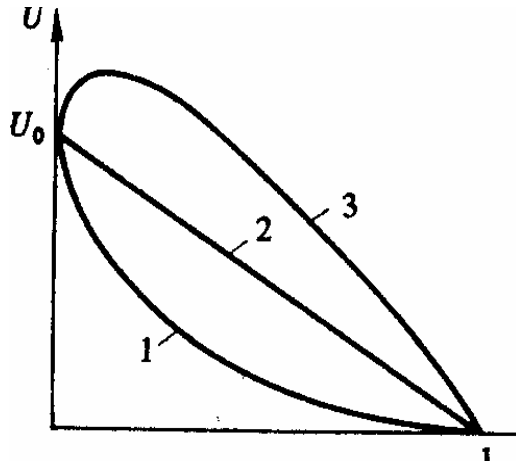
A menet- és tekercsrész szigeteléseket a túlfeszültségkorlátozók nem védik, ezen szigetelések átütése esetén rövidrezárt menetek keletkeznek, amelyekben igen nagy áramok alakulhatnak ki, tehát ez a jelenség üzemzavarra vezethet.

A menetszigetelések belső szigetelések, ezért általában nem regenerálódnak, így meghibásodásuk a kiesés mellett jelentős javítási költséget is okoz.

Kezdeti-, tranziens- és végállapot 1.



A földhöz képesti feszültség eloszlása a tekercselés mentén, földelt végpont esetében:
 1-kezdeti eloszlás
 2-végső eloszlás
 3-tranziens eloszlás: a kiegyenlítő lengések burkológörbéje



A kezdeti eloszlást az

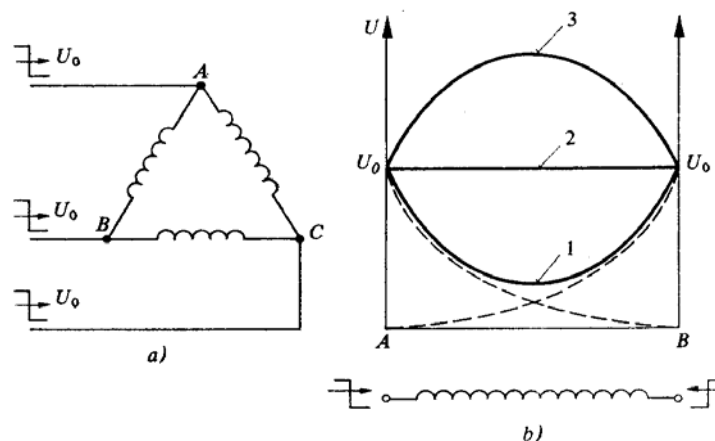
$$u = U_0 e^{-\alpha \frac{y}{l}}$$

függvény közelíti. Ebben $\alpha = \sqrt{C/K}$, a tekercselés típusának fontos jellemzője, y/l pedig a tekercselés menti pontok helykoordinátája.

Kezdeti-, tranziens- és végállapot 2.

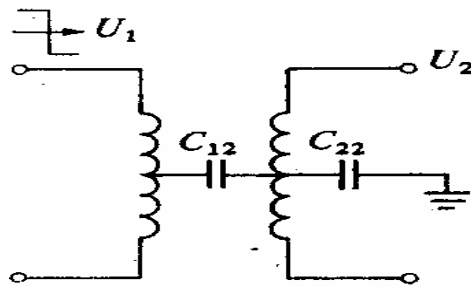
Hullámreflexió meredek homlokú hullám esetén: a tekercselés hatása $C=(C'K')^{1/2}$ nagyságú söntkondenzátoréval egyenértékű.

Feszültségeloszlás delta kapcsolású tekercselésben:



A földhöz képesti feszültség maximumai a tekercselések közepén alakulnak ki!

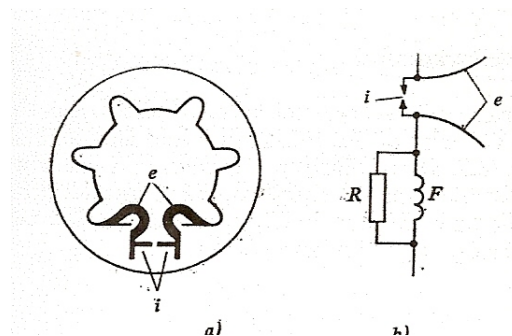
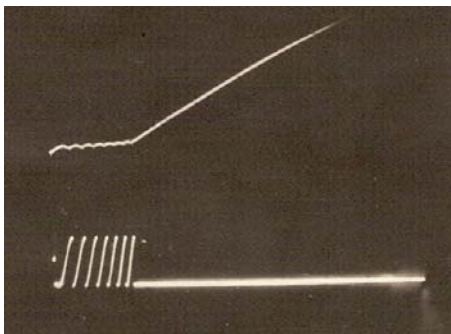
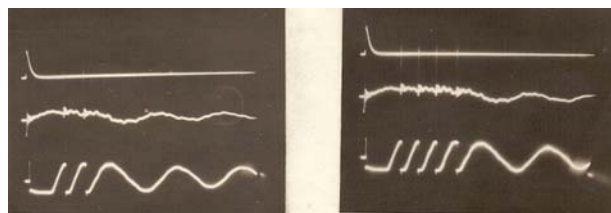
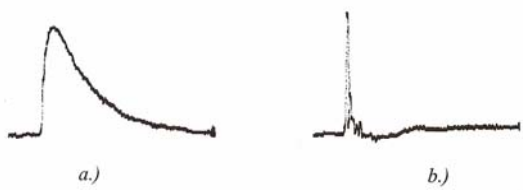
- A tekercselés viselkedése a behatoló hullám lassú változásának intervallumában (a hullámhátán) vezetékéhez hasonló.
- Levágott hullám hatása a menetszigetelések igénybevételére.
- A kezdeti eloszlás okozta veszélyes igénybevételt csökkenti:
kábeles bevezetés,
a tekercsrészekkel parallel kapcsolt kondenzátor,
kevertmenetű tekercselés.



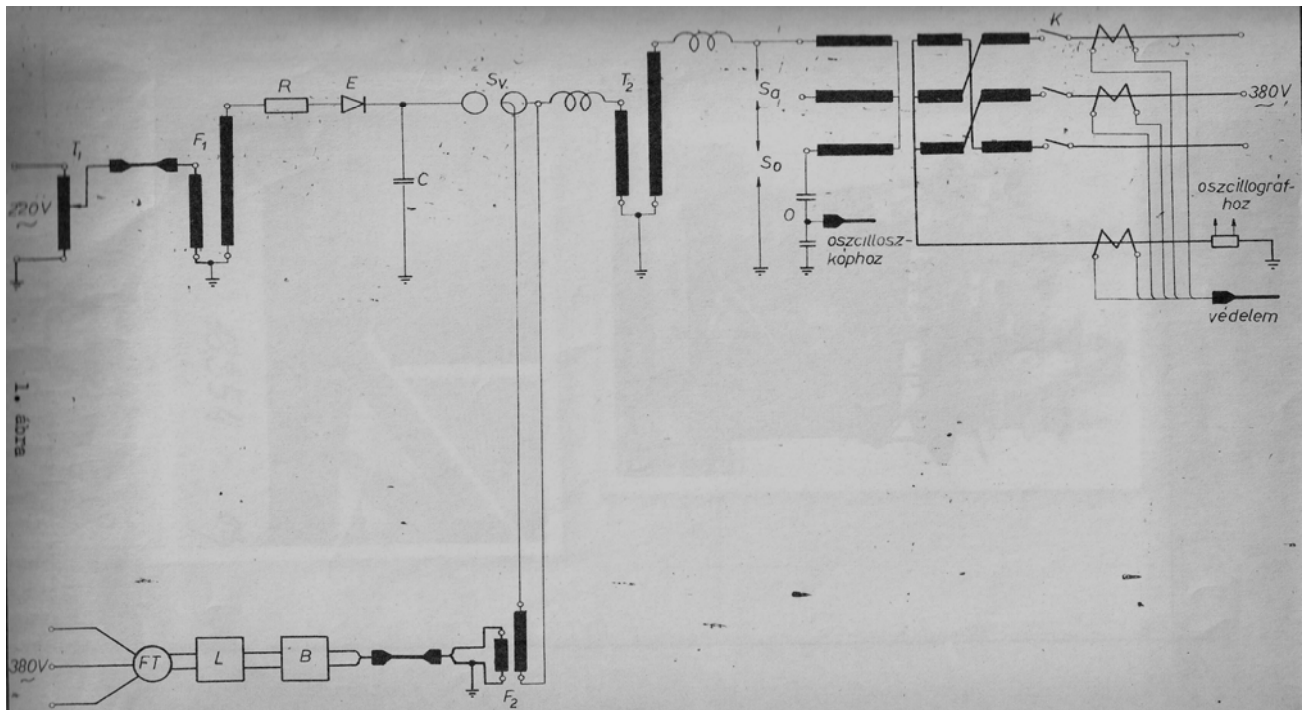
A vasmag mágneses jellemzői a meredek hullámhomlok idején nem érvényesülnek, mert az örvényáramok megakadályozzák a fluxusnak a vasba való hatolását. A mágneses tulajdonságok 6-10 μ s elteltével kezdenek szerepet játszani.

Meghibásodási kockázatra való tervezés?

Menetzárlat keletkezése

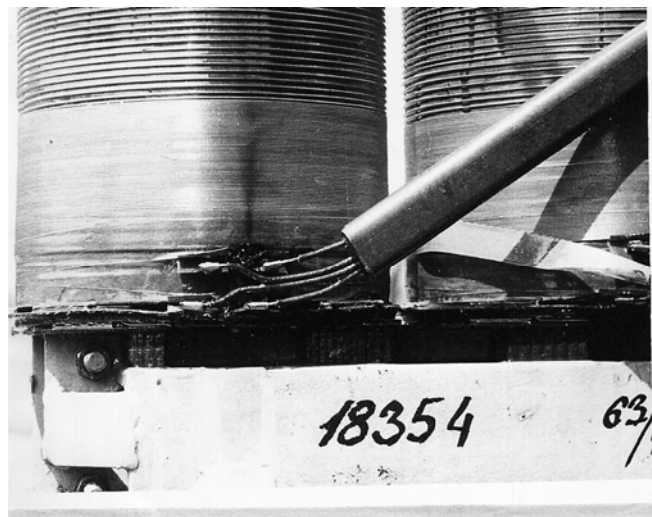
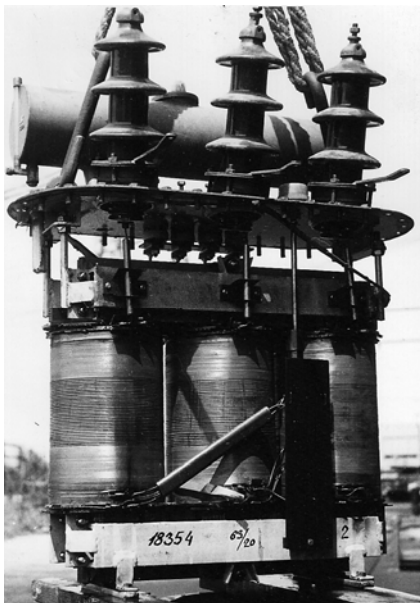
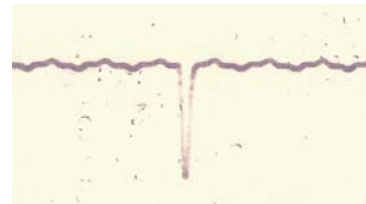
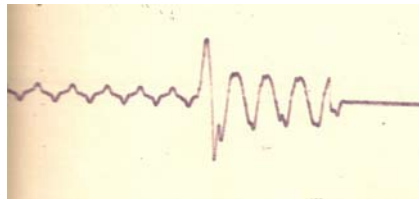


A zárlati hely kiégetése



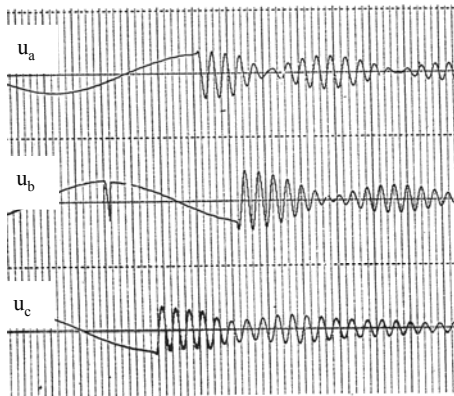
Kísérleti eredmények

Áramgörbék:

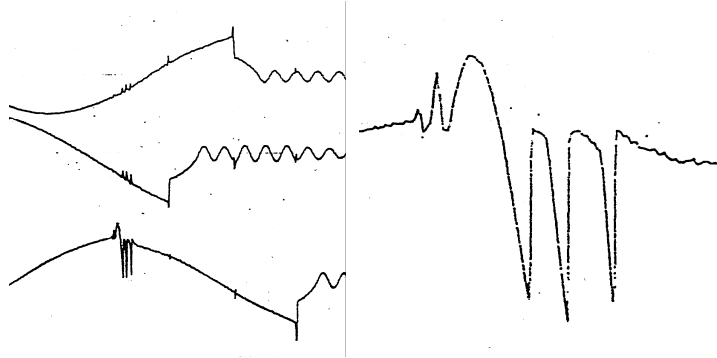


Söntfojtók kikapcsolása

A megszakítás hasonló tranzienszt produkál, mint kistávolságú zárlat kikapcsolása a vezetéki oldalon! A lebegés oka a fázisok közötti csatolás a gtyűjtő sín-szakaszon (modális lengések különválása).



Kikapcsolás korszerű SF₆ oltóközegű megszakítóval



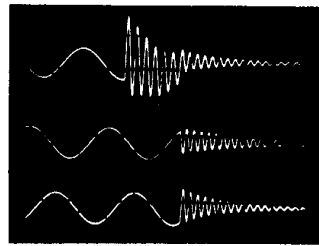
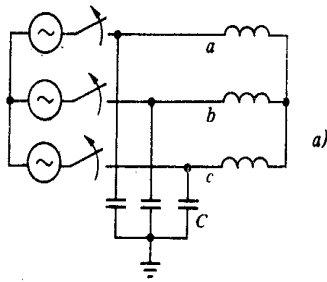
Kikapcsolás régebbi konstrukciójú, légnyomásos megszakítóval

Vezérelt megszakító működtetés!

Tranziensek forgógépek tekercselésében

- A forgógépek kikapcsolási tranzienseinek fontosságát aláhúzza az a körülmény, hogy tekercselésük nem olajszigetelésű, ezért a túlfeszültségekre fokozottan érzékenyek.
- E szempontból nagy jelentősége van pl. az erőművi transzformátorok primer – szekunder átvitelének, hogy a távvezetéki túlfeszültségek ne jelentsenek veszélyt a generátorszigetelésre.
- Különösen fontos az említett probléma távvezetésekre közvetlenül rádolgozó generátorok esetében, ami kisebb kiterjedésű hálózatokon szokásos konfiguráció, ritkán lakott területeken.

Motorok kikapcsolási tranziensei

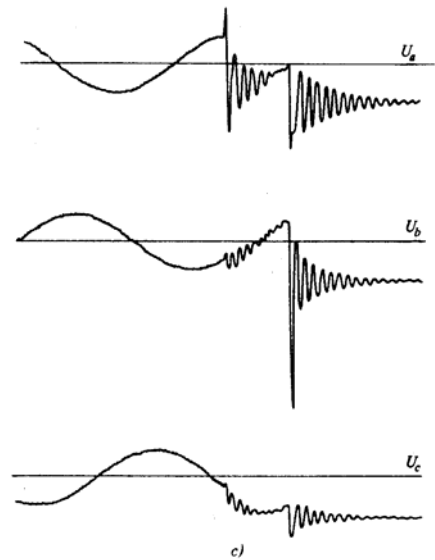


Háromfázisú motorok kikapcsolási tranziense

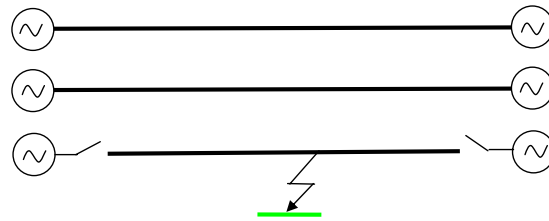
a) helyettesítő kapcsolás; b) a tranziensek alakulása áramlevágás nélküli

A megszakító jelentős áramlevágást produkált az elsőnek megszakító a fázisban, ezért nagy oltási csúcs alakult ki.

A b és c fázisban – a viszonylag nagy kábelhossz, tehát nagy földkapacitás miatt nem azonos pillanatban történt a megszakítás: előbb *b*, majd pedig *c* fázisban következett be. Így *b* fázisban „negatív áramlevágás” történt, vagyis az áram a polaritásváltás után szakadt meg. Ez a viszonylag ritka jelenség 6.8 pu túlfeszültségcsúcsot eredményezett.



Egyfázisú önműködő visszakapcsolás 1.



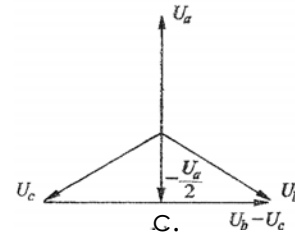
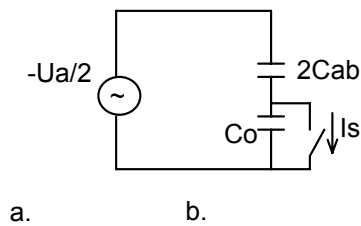
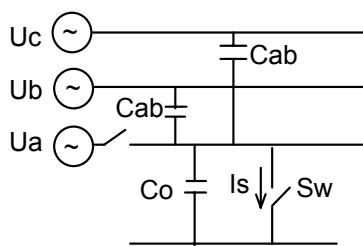
- Nem permanens (íves) zárlatok hárításának fontos eszköze
- Single Pole Reclosing, Single Phase Reclosing, Single Pole Switching (SPR, SPS)
- Einphasige Kurzunterbrechung
- Однофазное Автоматическое Повторное Включение (ОАПВ)
- Régebben főleg takarékosabb országokban használták, ma 500 kV feletti hosszú vezetékeken általánosan alkalmazzák (Japán tapasztalatok!)

Egyfázisú önműködő visszakapcsolás 2.

- Előnye: a stabilitást kevésbé veszélyezteti, mint a háromfázisú visszakapcsolás
- Hátrányai:
- Fázisonkénti megszakító-hajtást igényel,
- A szekunder ív csökkenti a hatásosságát nagyobb vezetékhosszaknál

Névleges feszültség (kV)	Sikeres hossz (mérőföld)	Sikeres hossz (km)	Kétséges hossz (mérőföld)	Kétséges hossz (km)
765	0-50	0-80	50-80	80-129
500	0-60	0-97	60-100	97-161
345	0-140	0-225	140-260	225-418
230	0-300	0-483	300-500	483-805

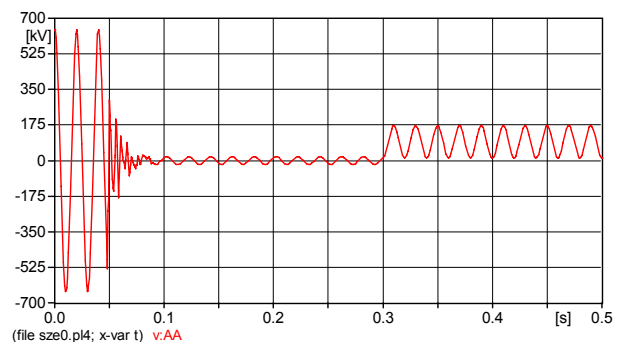
Mi is az a szekunder ív?



A szekunder ív árama a fenti áramkörben: $I_{\text{szek,eff}} = -j\omega C_{ab} U_{a,\text{eff}}$

A szekunder ívnek az üzemi frekvenciájú áram természetes nulla-átmenetekor történő megszakítását követően az ív helyén fellépő U_v visszaszökő feszültséget az alábbi egyenlet írja le:

$$U_v = \pm U_a \frac{C_{ab}}{C_0 + 2C_{ab}} (1 - \cos \omega t)$$

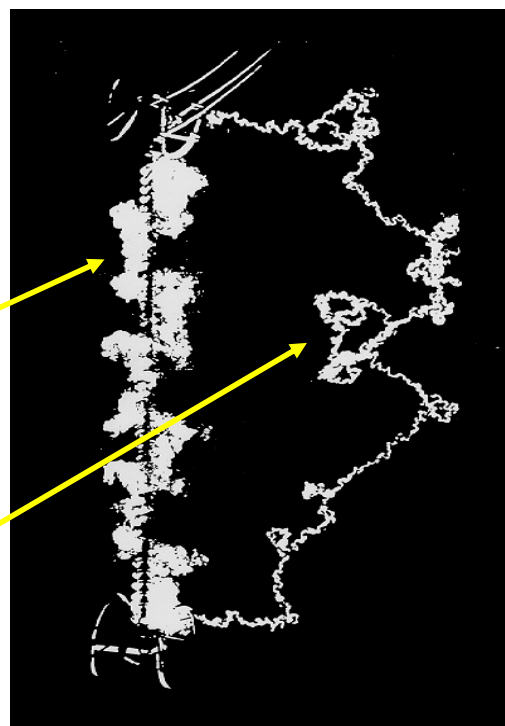


A szekunder ív főbb jellemzői

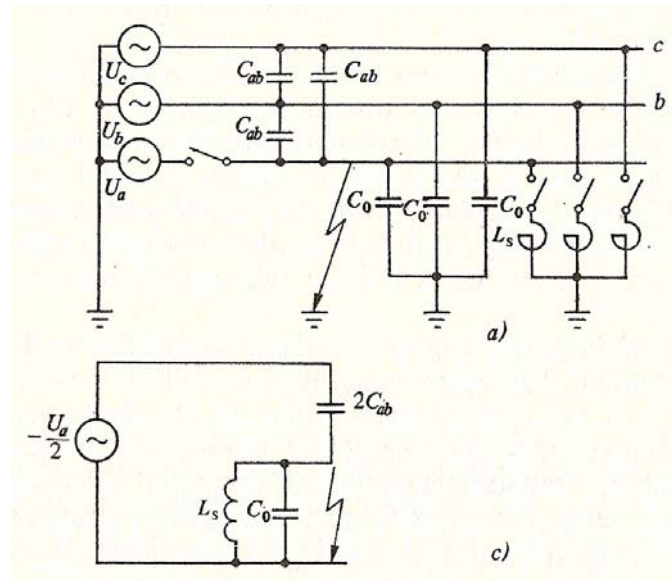
- stochasztikus meteorológiai hatások
- Vízszintes és függőleges elmozdulás
- A primer plazmában alakul ki
- Kialvását intermittens periódus készíti elő

Primer ív

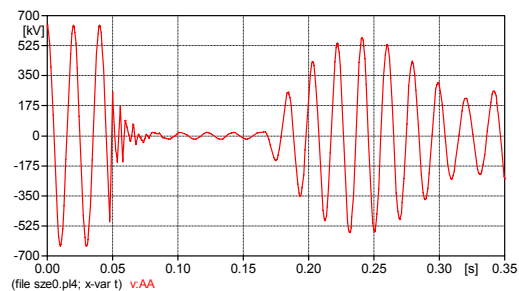
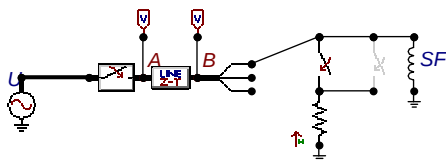
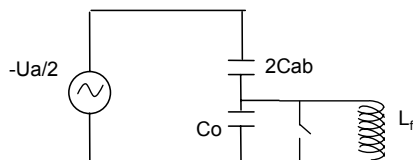
Szekunder ív



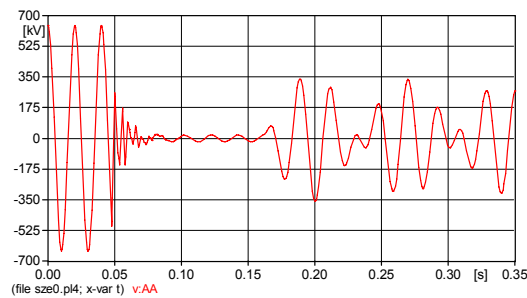
Szekunder ív söntkompenzált távvezetéken 1.



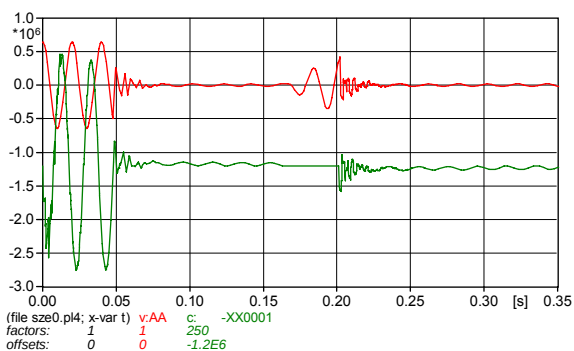
Szekunder ív söntkompenzált vezetéken 2.



$L_{SF}=2H$



$L_{SF}=5H$



← Visszagyújtás okozta tranziens a szekunder ívben

A távvezetékeknek a környezetbe való helyes integrálása jogos és növekvő társadalmi törekvés.

- Egyik lehetőség: kompaktabb, esetleg kombinált távvezetékek létesítése (compacting)
- Másik lehetőség: átalakítani egyes, régebben létesült távvezetéseket magasabb feszültségűre (upgrading)
- Mindkét megoldás megköveteli a fázisok közötti, valamint a fázisok és a föld közötti távolságok redukálását.

Következésképpen várható

- a villámcsapások okozta távvezetési zárlatok számának a megnövekedése, valamint
- a távvezetékek fázisvezetői közötti C_{ab} kapacitás növekedése.

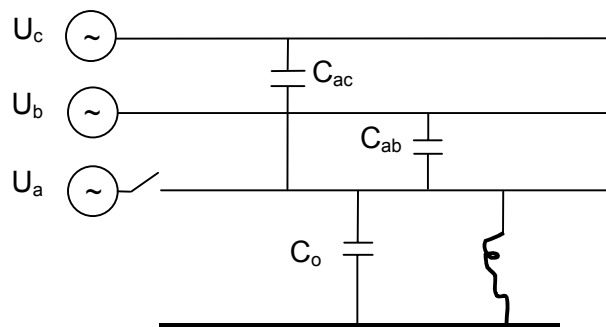
Az egyfázisú visszakapcsolás hatásosabbá tételével némiképpen kompenzálni lehetne a távvezetési zárlatok számának várható növekedését.

A holtidő megengedhető hosszúságát a stabilitási követelmények korlátozzák, ezért a hosszú ideig tartó szekunder ívelés veszélyezteti a visszakapcsolás sikerességét.

Adott meteorológiai paraméterek mellett a szekunder ív spontán kialakulása annál később következik be, minél nagyobb a szekunder ív árama.

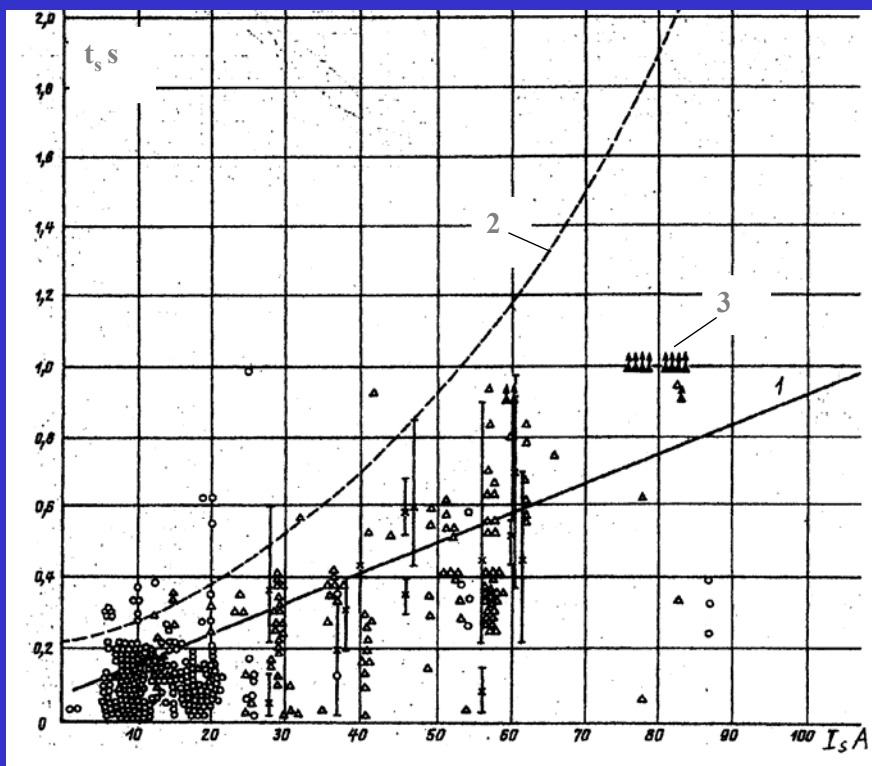
Ezért kompakt konstrukciójú távvezetékek létesítése, amelyeknél C_{ab} nagyobb, mint a konvencionális távvezetékek esetében, hosszabb idejű szekunder ívelést eredményez, tehát az egyfázisú visszakapcsolás hatásossága ellen hat.

C_{ab} és C_0 értékek konvencionális, illetve kompakt távvezetéki konstrukciónál



Configuration	C_0 [nF/km]	C_{ab} [nF/km]
Conventional 400 kV line	8.235	0.907
Compact 400 kV line 2x500 mm ²	7.03	1.83
Compact 400 kV line 3x300 mm ²	7.46	2.16

THE SPREAD OF THE EXPERIMENTAL DATA



The dependence of the extinction time on the steady-state secondary current amplitude for lines without shunt compensation

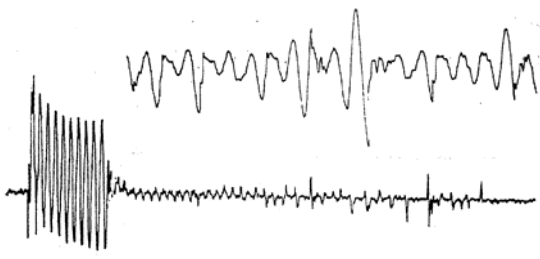
- 1 - regression straight
- 2 - curve of 90% reliability
- 3 - arc did not extinguish

Következtetések:

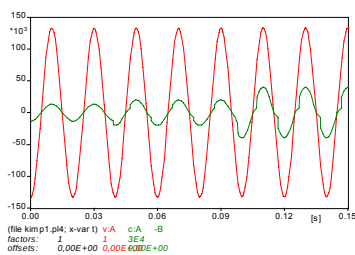
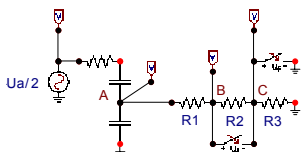
- A nemzetközi szakirodalomban referált kísérleti eredmények tendenciája alátámasztja azt a megállapítást, hogy a szekunder ív spontán kialvási ideje nő a vezetékek feszültség szintjével, hosszával, tehát a szekunder ív áramával.
- A kísérleteknél kapott ívidőtartamok igen nagy szórást mutatnak, ami azt tükrözi, hogy a $t=f(I_s)$ ábrázolás nem tekinthető generalizáló koordináta rendszernek.
- Ennek alapján ajánlatos kísérleti úton megállapítani a szekunder ívfolyamat hasonlósági kritériumait (invariánsait) a különböző távvezetéseken végzett kísérletek eredményeinek korrekt összegzése és általánosítása érdekében.

A Hévíz–Tumbri–Szlovénia 400 kV-os rendszerközi távvezetéken végzett szekunder ív – kísérletek eredményei

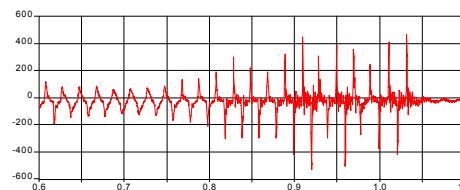
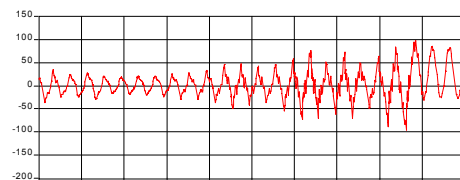
- Az új, 310 km hosszú 400 kV-os, kétrendszerű vezeték üzembehelyezése előtt hét szekunder ív kísérletet folytattak le az ív spontán kialvási idejének megalapozott becslése érdekében. Ezek közül egy primer ívvel végzett kísérlet volt, a többi primer ív nélkül, vékony vezetőszállal kezdeményezték.
- A legrövidebb ívelési időtartam 0.05 mp volt.
- A leghosszabb, spontán kialvással végződő ívelés 4.0 mp-ig tartott
- Egyik kísérlet alkalmával a szekunder ív nem aludt ki spontán, ezért a vezeték az ívelés 27. mp-e után kikapcsolták.
- A hazai 400 kV-os vezetékekre nézve a stabilitási kritériumok tekintetbevételével a holtidő felső határát 1.5-2 mp-ben határozták meg.



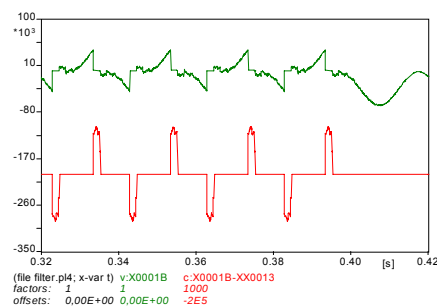
A teljes folyamat (750 kV-os
vezetéken végzett kísérlet)



Az ívelés kezdeti
szakasza

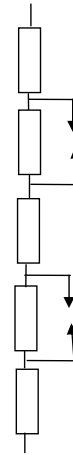
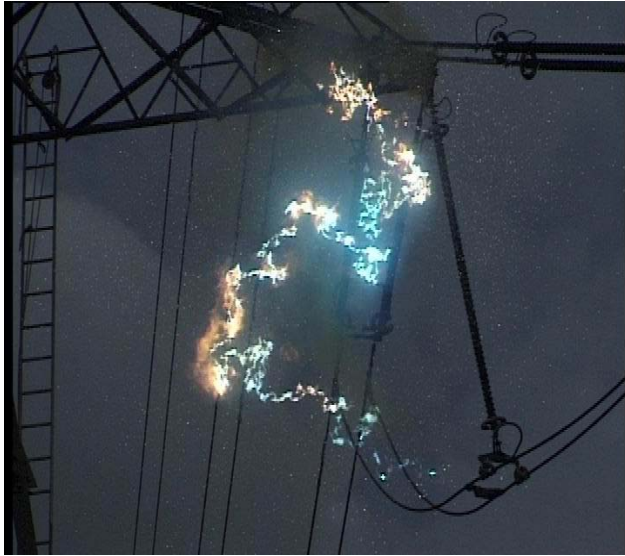


A zárát helyén mért feszültség
és a szekunder ív árama



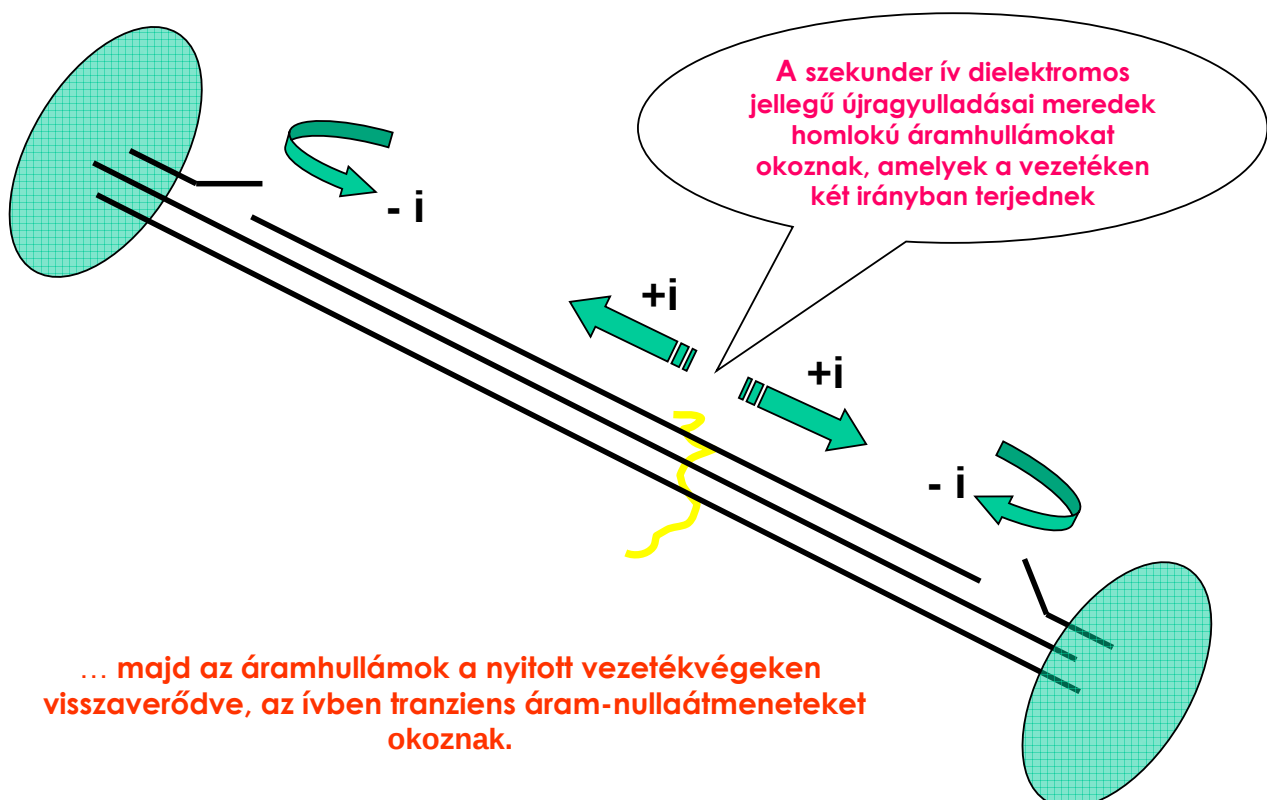
Szabályos alakú impulzusok
az ív áramában

A szekunder ív intermittens szakaszának eredete

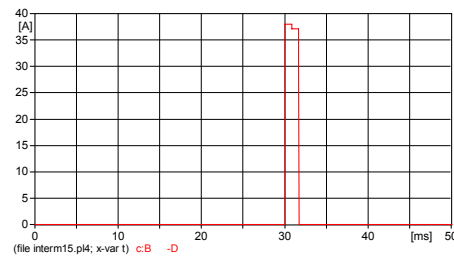
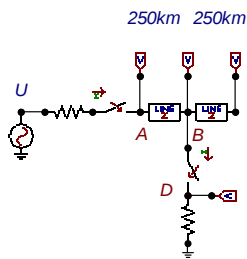
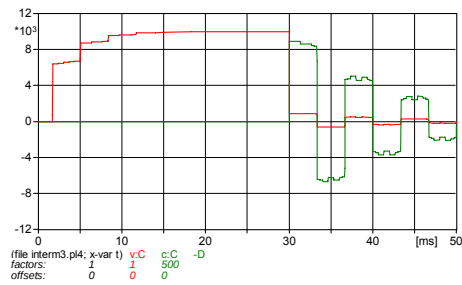
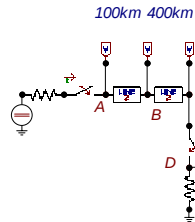


- Az ív hossza jelentősen megnyúlik, egyes szakaszai lehűlnek, ezeknek ionizációs foka lecsökken.
- Emiatt a folyamatos ívéges valamelyik késői áram nulla-átmenetét követően csak a visszazökő feszültség jelentős értékénél gyújt vissza az ív.
- A visszagyújtás meredek homlokú hullám keletkezésével jár.

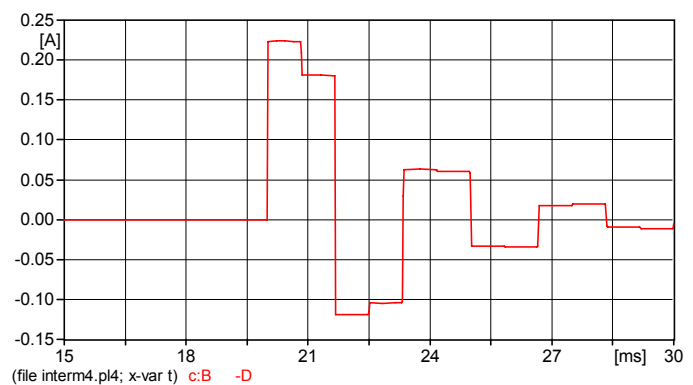
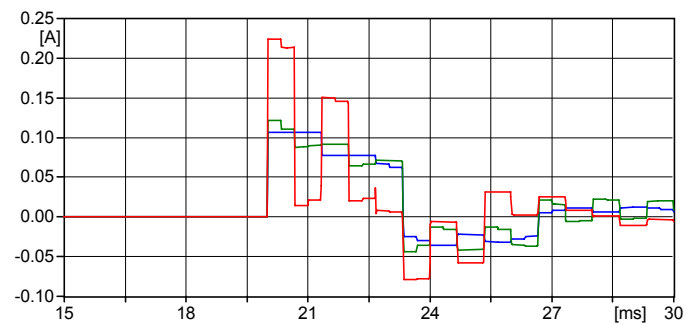
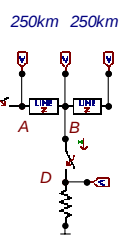
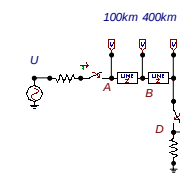
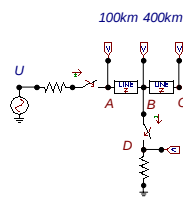
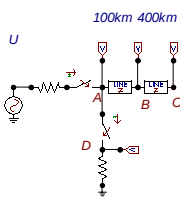
Az ív termikus tranzienseinek és a vezeték hullámfolyamatainak kölcsönhatása



Az intermittens szakasz íváramai 1.



Az intermittens szakasz íváramai 2.

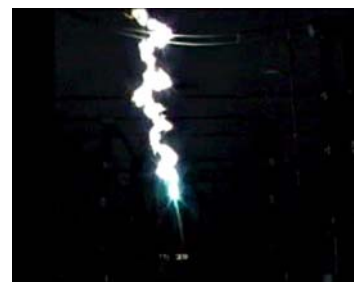


Az intermittens ívelés szakaszában a vezetéken lezajló hullámfolyamatok szerepe

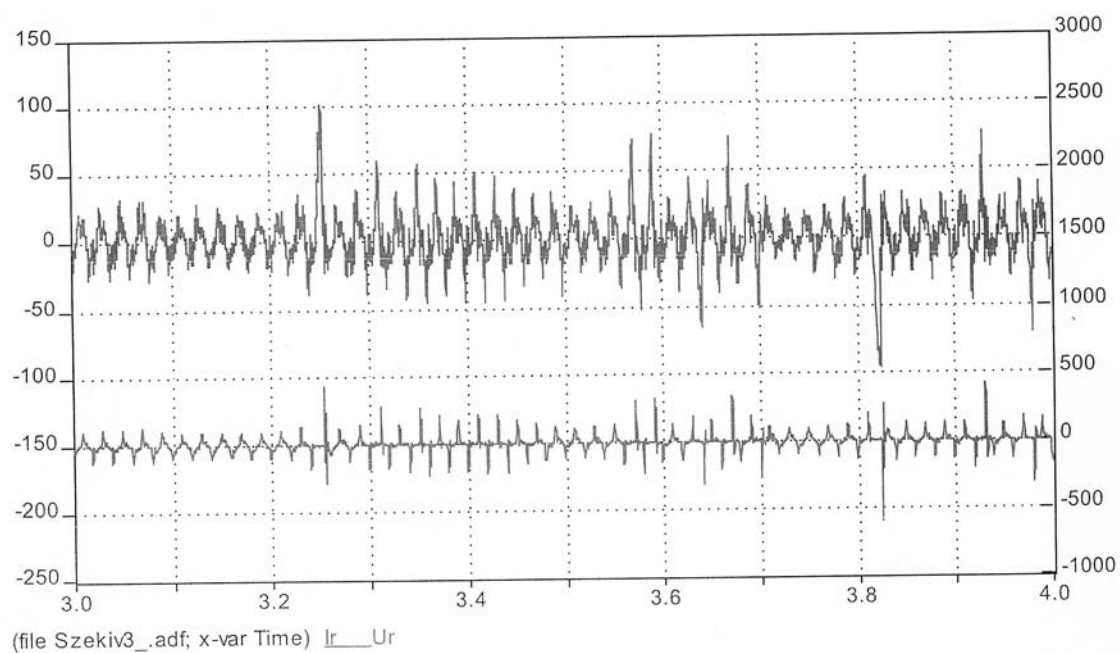
- Érthetővé teszik a szekunder ív áramimpulzusainak szabályos jellegét,
- Az ív-visszagújtások energiáját és így az ív termikus állapotát függővé teszik
 - a távvezeték konfigurációjától,
 - a zárlat helyétől,
 - a visszagújtás pillanatától (fázishelyzetétől)

Ennek következtében a szekunder ívfolyamat korrekt szimulációjába a távvezeték hullámfolyamatait feltétlenül be kell építeni.

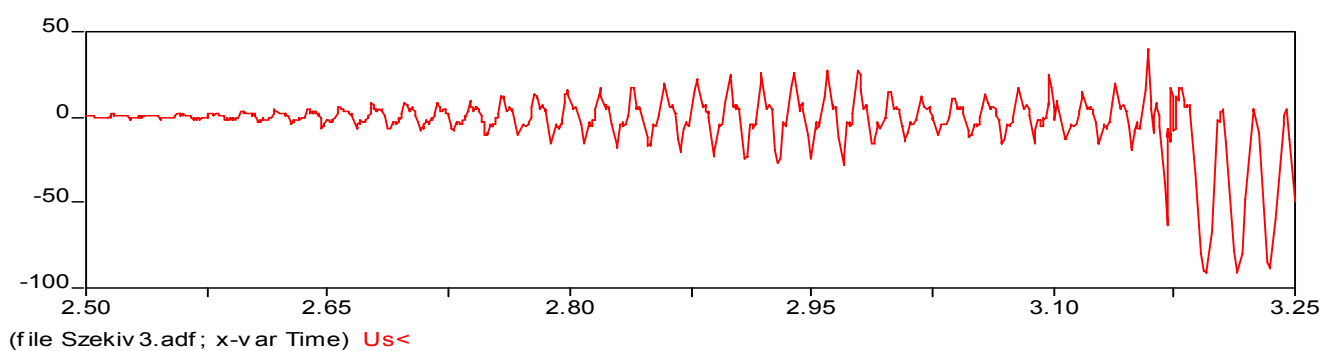
A szekunder ívfolyamat intermittens szakaszát a távvezetéken lezajló elektromágneses és az ívoszlopban végbemenő termikus tranziensek kölcsönhatása jellemzi. A spontán ívkialvást mindig megelőzi az intermittens szakasz, amely meghatározó szerepet játszik a spontán kialvás folyamatában.



Részlet 27 mp alatt spontán meg nem szűnő szekunder ív feszültség- és áram regisztrátumából



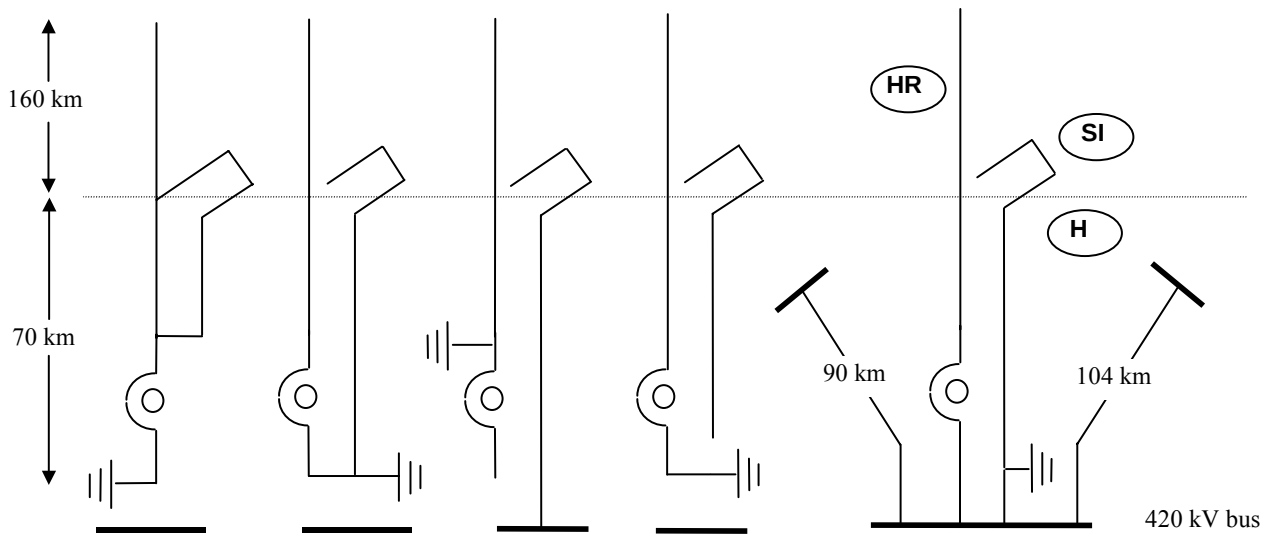
Az ív lerövidülése meghosszabbítja az ívidőt



Az ív-begyűjtési mód nem képezi le helyesen a valóságot!



A 400 kV-os vezetéken végzett kísérletek alkalmával vizsgált konfigurációk



Lehetőségek a kísérleti módon kapott eredmények színvonalasabb általánosítására

Laboratóriumi (steril) körülmények között lefolytatandó kísérletekkel kellene tisztázni azon tényezők hatását, amelyek felelőssé tehetők a hálózati kísérleti adatok nagymértékű szórásáért (pl. primer ív elhagyhatósága, a szekunder ív begyújtási technikája).

Célszerű lenne nemzetközi szinten elfogadható ajánlást készíteni a szekunder ívvel kapcsolatos hálózati kísérletek technológiáját, valamint a kísérletek alkalmával rögzítendő paramétereket illetően.

Az ilyen alapon szervezett és lefolytatott kísérletek alkalmasak lennének az ívfolyamat hasonlósági invariánsainak meghatározására és nemzetközi szinten használható, megalapozott általánosító diagram megalkotására

Az ívbegyűjtás technológiája

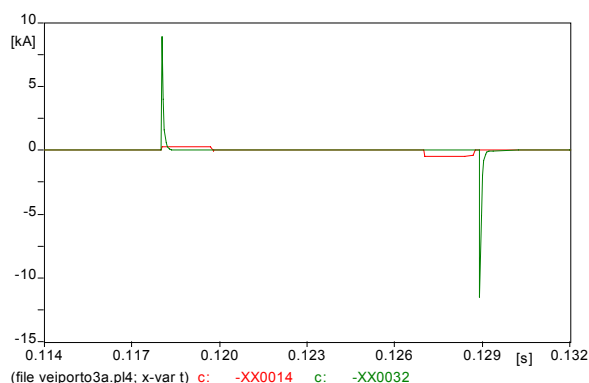
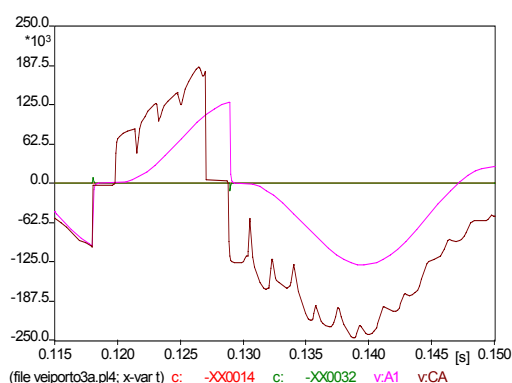
Több szerző állítja, hogy a primer ív által hátrahagyott plazma nem befolyásolja a szekunder ív kialakulási idejét, ha ez az időtartam nagyobb, mint 0.7 ms.

Tapasztalatunk szerint a szekunder ív begyűjtására alkalmazott vezető szál keresztmetszete és elhelyezése jelentős hatással lehet a szekunder ívfolyamat időtartamára.



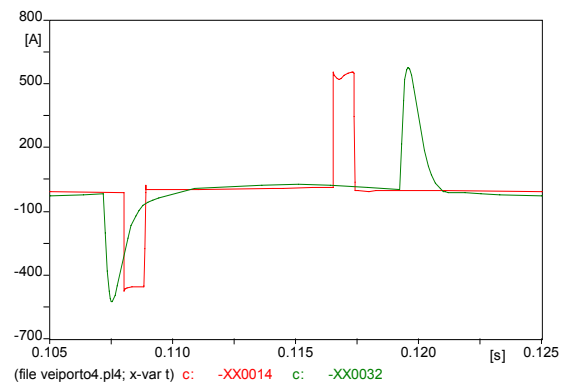
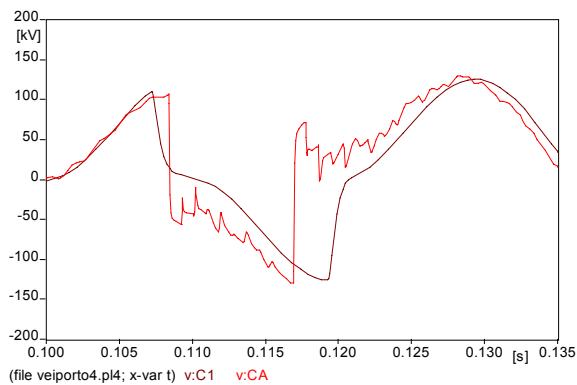
A szekunder ívfolyamat laboratóriumi vizsgálata 1.

A jelenleg alkalmazott laboratóriumi kísérleti áramkörök általában nem veszik tekintetbe a távvezetéken lezajló hullámfolyamatokat

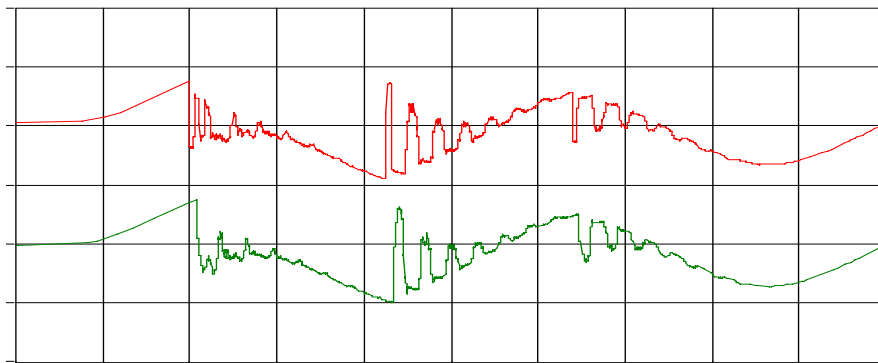
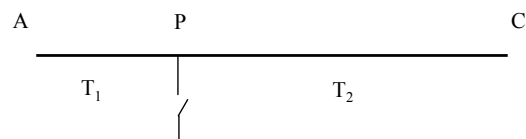


A szekunder ívfolyamat laboratóriumi vizsgálata 2.

A valóságos folyamathoz sokkal hasonlóbb feszültség-
és áramalakok érhetők el néhány Π taggal kiegészített áramkörrel

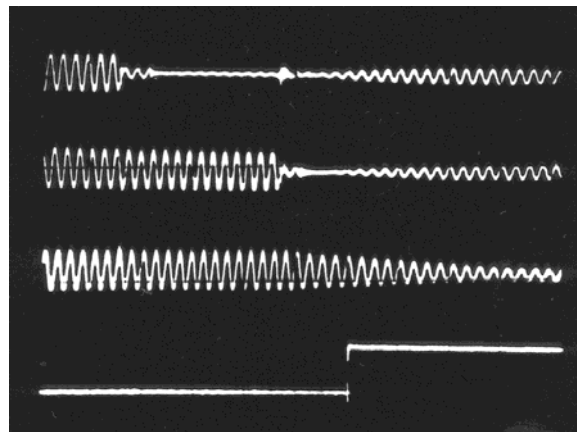
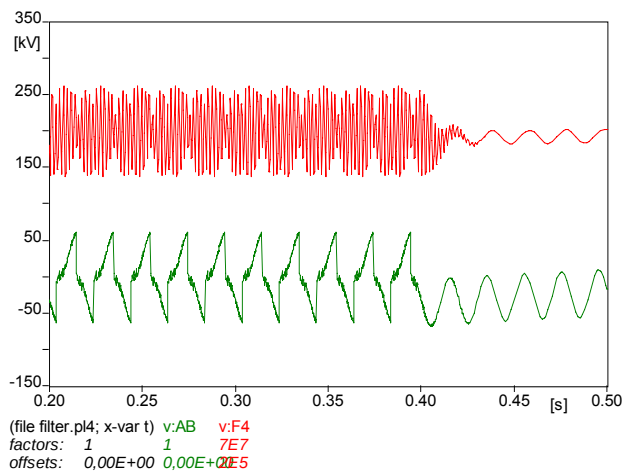


A szekunder ív végleges kialvásának érzékelése 1.



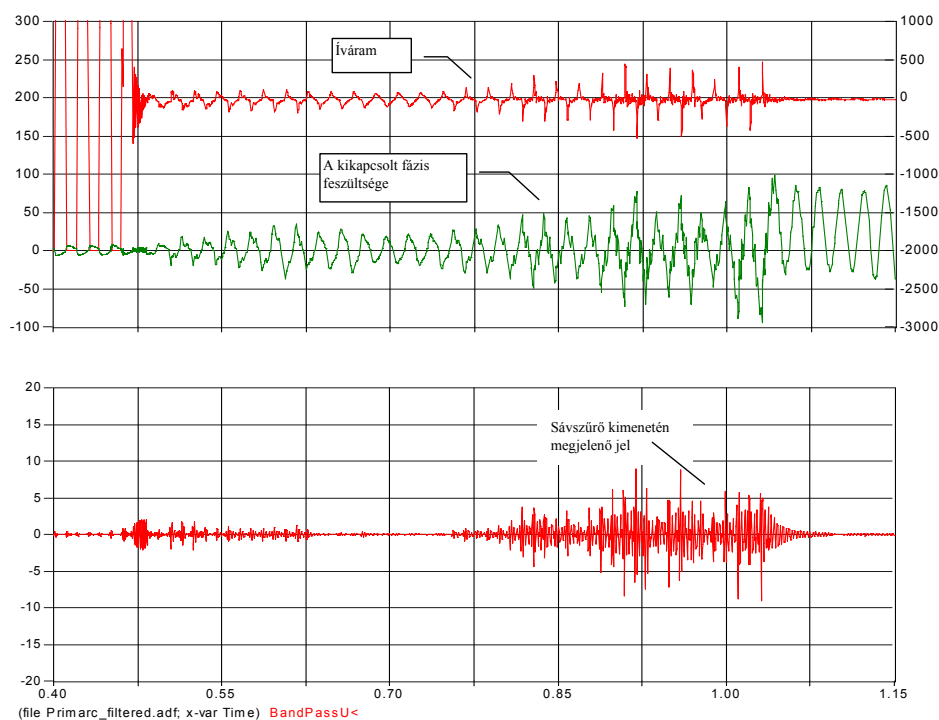
A vezetékvégeken mérhető visszaszökő feszültség
jellemző frekvenciái.

A szekunder ív végleges kialvásának érzékelése 2.

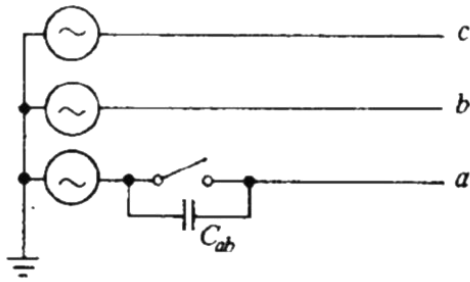


750 kV-os távvezetéki regisztrátum

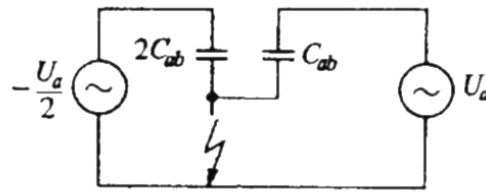
A szekunder ív végleges kialvásának érzékelése 3. (400 kV-os távvezetéki regisztrátum)



Megoldások a szekunder ív időtartamának rövidítésére 1. (söntkompenzálás nélküli távvezeték)



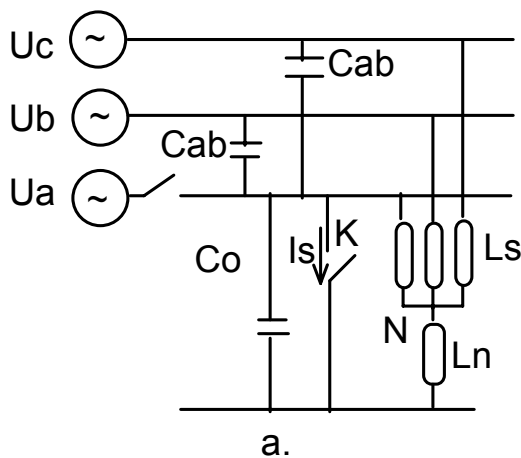
hálózati kapcsolás



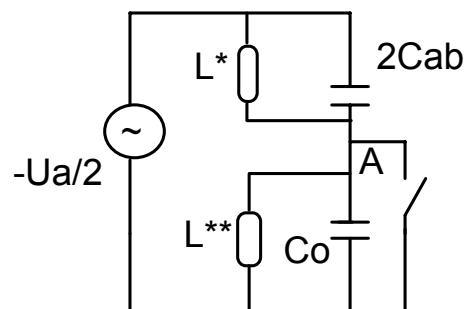
referencia kapcsolás

- Olyan automatikát igényel, amely gondoskodik arról, hogy a C_{ab} kapacitású kondenzátor csak az egyfázisú visszakapcsolás holtidejében iktatódjon be.
- Gondoskodni kell az áthidaló kondenzátor kiiktatásának lehetőségéről is.
- A megoldás hátránya a kondenzátor létesítésével kapcsolatos többlet beruházási igény.

Megoldások a szekunder ív időtartamának rövidítésére 2 (söntkompenzált távvezeték)

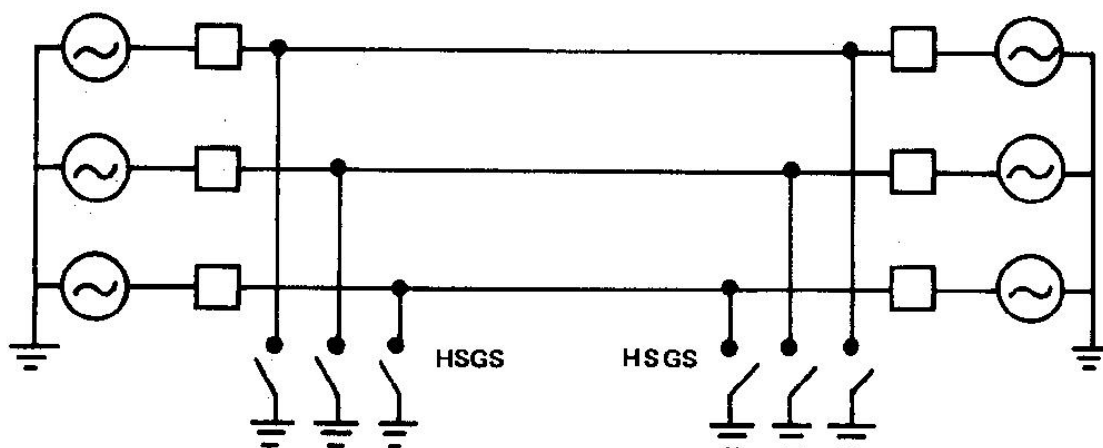


a.



b.

Megoldások a szekunder ív időtartamának rövidítésére 3.



(HSGS- High-Speed Ground Switch – nagysebességű földelőkapcsoló)

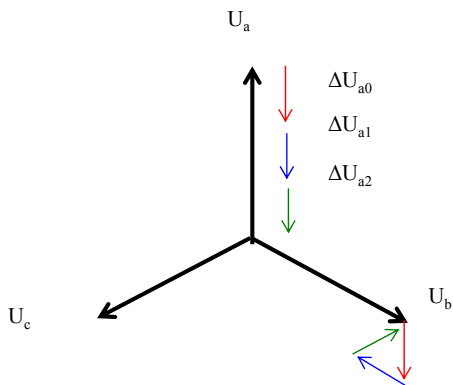
A csillagpont kezelésével kapcsolatos tranziensek

- Hasonlóan a szekunder ívhez, itt is fontos szerepet játszik az elektromágneses tranziensek és az ív kölcsönhatása, valamint az ív spontán kialvása
- Kapcsolási tranziensek: általában nem kezelik hullámfolyamatként
- Földelt csillagpontú hálózat
- Szigetelt csillagpontú hálózat
- Kompenzált hálózat
- Ellenálláson keresztül földelt csillagpontú hálózat (hosszú földelés)
- Összehasonlítás, összefoglalás

A csillagpont földelési módjával befolyásolható a aszimmetrikus (elsősorban FN) zárlatok árama és az ép fázisok feszültsége

- Fontos körülmények:
- A villamosenergia rendszeren bekövetkező zárlatok mintegy 80%-a FN zárlat.
- Íves, ívelő (intermittens) zárlat.
- A nem túlságosan nagy áramú és nem fémes zárlatokat is rövid idő alatt fel kell számolni, mert a teljesítményív magas hőfoka miatt a vezetéket károsíthatja.
- Az ív súlytalansága miatt gyorsan terjed és további zárlatokat okozhat.
- A zárlati áram a földben potenciálemelkedés, veszélyes érintési-, valamint lépésfeszültség okozója lehet.

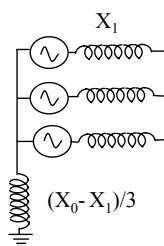
Földelt csillagpontú hálózat 1.



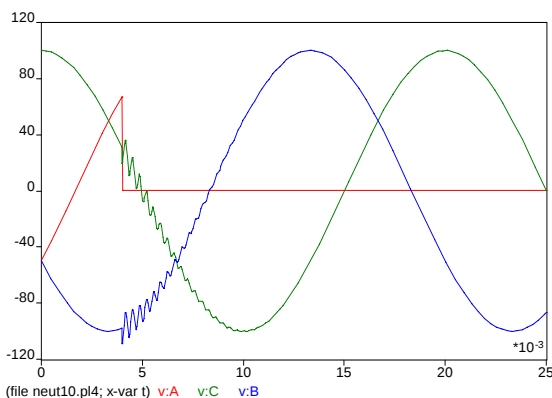
- **Hatásosan földelt csillagpontú hálózat:**
- Ha valamely hálózaton az ép fázisvezetők feszültségemelkedése FN zárlatkor nem haladja meg a vonali feszültség 80%-át, tehát a fázisfeszültség 138%-át
- Az, hogy a hálózat eleget tesz-e fenti követelménynek, vagy sem, azt az X_0/X_1 , valamint az R_0/R_1 viszony határozza meg, valamint az adott hálózaton lévő transzformátorok csillagpont-földelésének jellemzői.

A "hatásosan földelt" meghatározás nem valamely transzformátor csillagpontjának földelését jellemzi, hanem az egész hálózatra vonatkozó kritérium, illetve minősítés!

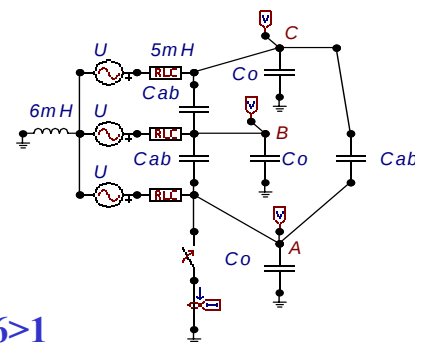
Földelt csillagpontú hálózat 2.



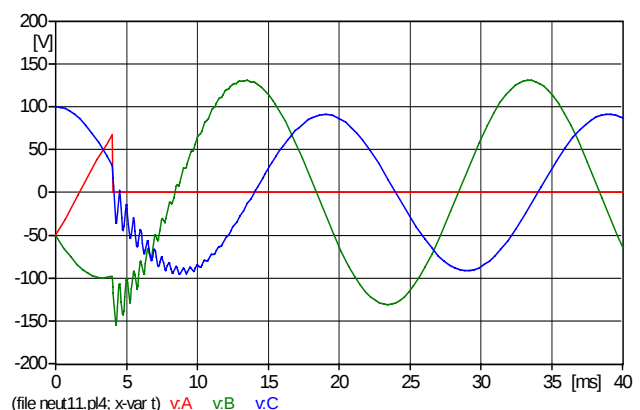
$$X_0/X_1=1$$



Az ép fázisok feszültsége nem növekszik



$$X_0/X_1=4.6>1$$

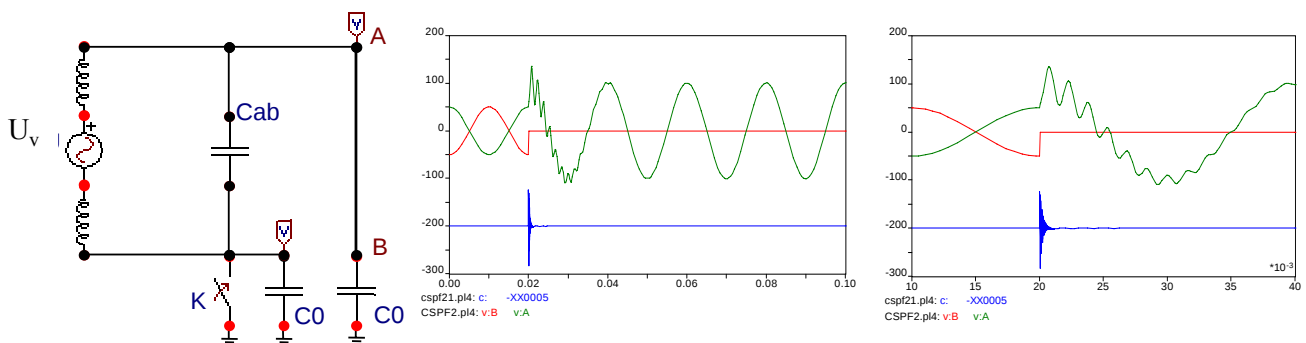


Az ép fázisok feszültsége 30%-kal megnő

Földelt csillagpontú hálózat 3.

- A készülékek szigeteléseiivel szembeni követelmények kisebbek és így áruk alacsonyabb.
- Az FN zárlat időtartamában fellépő, időszakos túlfeszültség (TOV) szintje alacsonyabb, így a túlfeszültségvédelem hatásosabb, mert alacsonyabb védelmi szinttel valósítható meg.
- A relévédelem egyszerű és hatásos.
- A megszakítók sokszor működnek, nagy zárlati áramokat szakítanak meg (drága konstrukciót, sok karbantartást igényelnek).
- A nagy földzárlati áramok a gyengeáramú vezetékekre erős befolyást fejtenek ki, nagy lépés- és érintési feszültséget okoznak.

Zárlati tranziens kétfázisú vezetéken



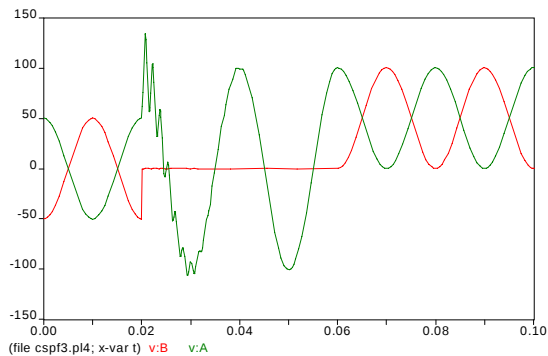
A zárlat pillanatában a zárlatos fázis földkapacitásának töltése a zárlati íven keresztül kisül. C_o kapacitás C_{ab} kapacitással parallel kapcsolódik és U_k közös feszültség alakul ki a két kondenzátoron. A vonali feszültséget U_v -vel, a fázisfeszültséget pedig U_f -fel jelölve :

$$U_v C_{ab} + U_f C_o = U_k (C_{ab} + C_o), \text{ ebből } U_k \text{ kiszámítható.}$$

A közös feszültségről a két parallel kapcsolódott kondenzátornak U_v feszültségre kell kerülnie. Az ép fázisban kialakuló tranziens feszültség csúcsértéke:

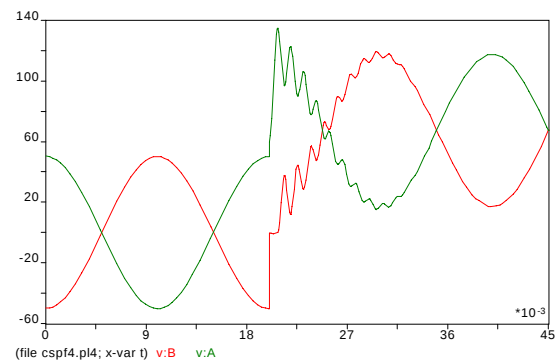
$$2(U_v - U_k) + U_k = 2U_v - U_k$$

Zárlati ív kialakulásának tranziense kétfázisú vezetéken



az üzemi áram nullaátmenetében

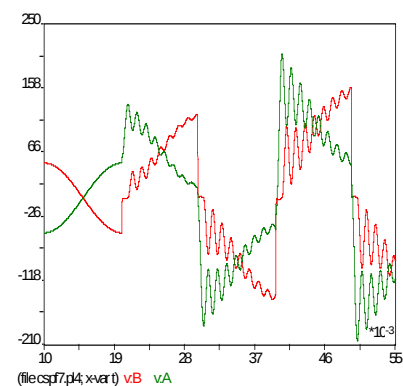
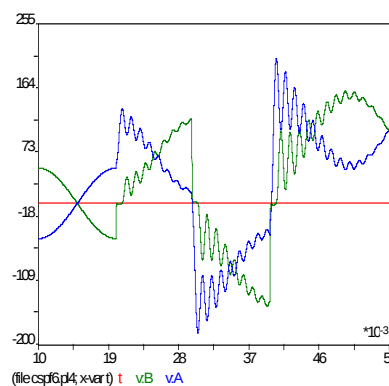
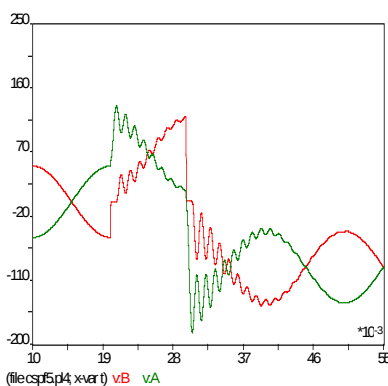
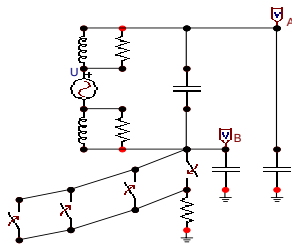
Az ívkialvást követően a fázisfeszítéssel megegyező nagyságú, zérus sorrendű feszültség marad a rendszerben, ami a fázisfeszítések eltolódását okozza. Az áramnullaátmenet pillanatában a tápáramkör teljes feszültsége gyakorlatilag C_0 kondenzátorra esik, ez a kondenzátor a zárlat megszűnése után nem tud kisülni.



a tranziens első áram-nulla-átmenetében

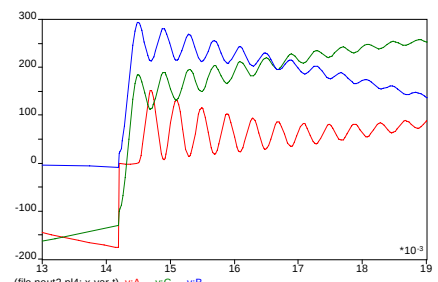
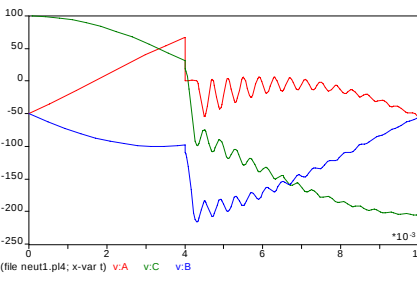
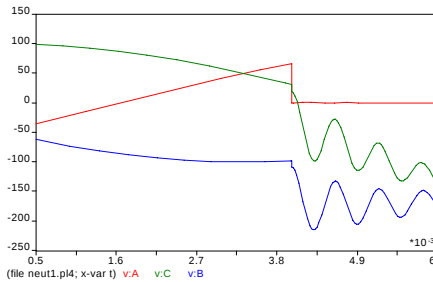
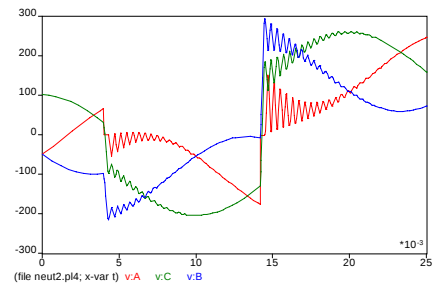
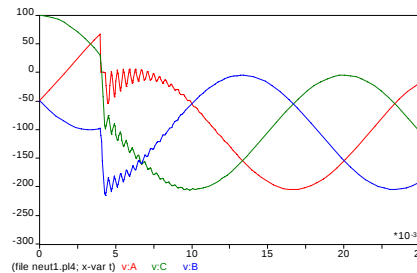
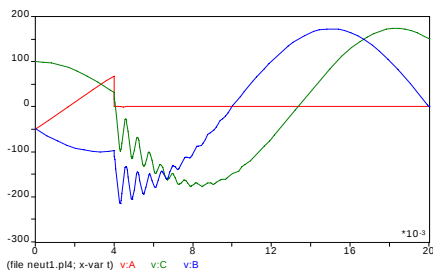
Az áram nullaátmenet pillanatában a csillagpont feszültsége, tehát a zérus sorrendű feszültség $\frac{1}{2}(2U_v - U_k)$. Ez a zérus sorrendű feszültség bennmarad a rendszerben, így a fázisfeszítést meghaladó egyenáramú eltolódás jön létre

Ívelő földzárlat kétfázisú hálózaton



feszültség - maximumok: 134 V, -183 V, 205 V, -206 V

Ívelő földzárlat háromfázisú, szigetelt csillagpontú hálózaton



**Zárlati tranziens
ívkialvás nélkül**

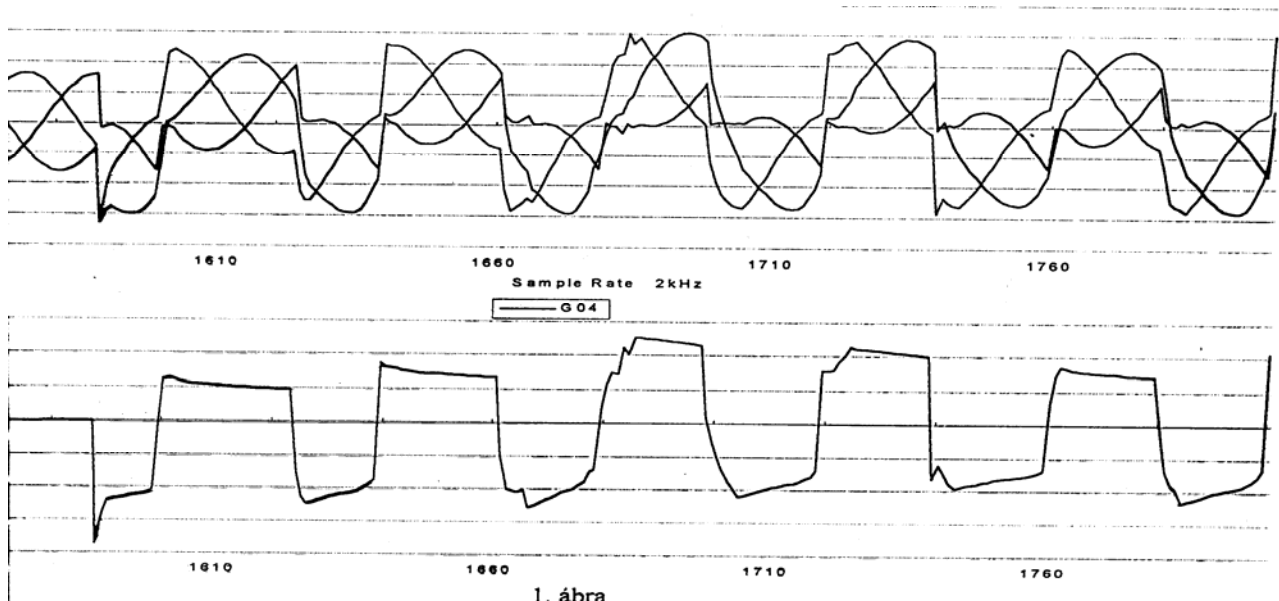
**Ívkialvás az első áram-
nullaátmenetben**

**Többszörös visszagyújtás:
ívelő földzárlat**

A tranziens folyamat mennyiségi jellemzői háromfázisú hálózaton

- 1. A folyamat kezdetén a két C_{ab} parallel kapcsolódik a két C_o -lal.
- 2. A feszültségek kiegyenlítődnek: $2(C_{ab}+C_o)U_k = 2C_o \cdot 0,5U_f + 2C_{ab} \cdot 1,5U_f$
 $U_k = U_f(0,5+k)$; $k = C_{ab}/(C_{ab}+C_o)$; Középfeszültségen $k \approx 0,2$
- 1. 2. A lengés maximális amplitudója: $A = 1,5U_f - (0,5+k)U_f = U_f(1-k)$
- 3. A legnagyobb feszültségcsúcs: $U_{bmax} = U_f(0,5+k) + 2A = (0,5+k)U_f + 2(1-k)U_f = (2,5-k)U_f$
- 4. Ha az ív a legnagyobb feszültségcsúcs pillanatában szakad meg:
 $3C_oU_0 = 2C_oU_{bmax}$; $U_0 = 2/3 \cdot U_{bmax} = 2/3 \cdot U_f(2,5-k)$
- 5. Ha az ív a tranziens lecsillapodása után, az üzemi frekvenciájú áram természetes nullaátmenetében szakad meg:
 $3C_oU_0 = 2C_o \cdot 1,5U_f$ $U_0 = 2/3 \cdot 3/2 \cdot U_f = U_f$

Erőművi szigetelt csillagpontú segédüzemi kábelhálózaton keletkezett ívelő földzárlat regisztrátuma



A felső sorban a három fázisfeszültség, az alsó sorban pedig a
zérus sorrendű feszültség időfüggvénye látható

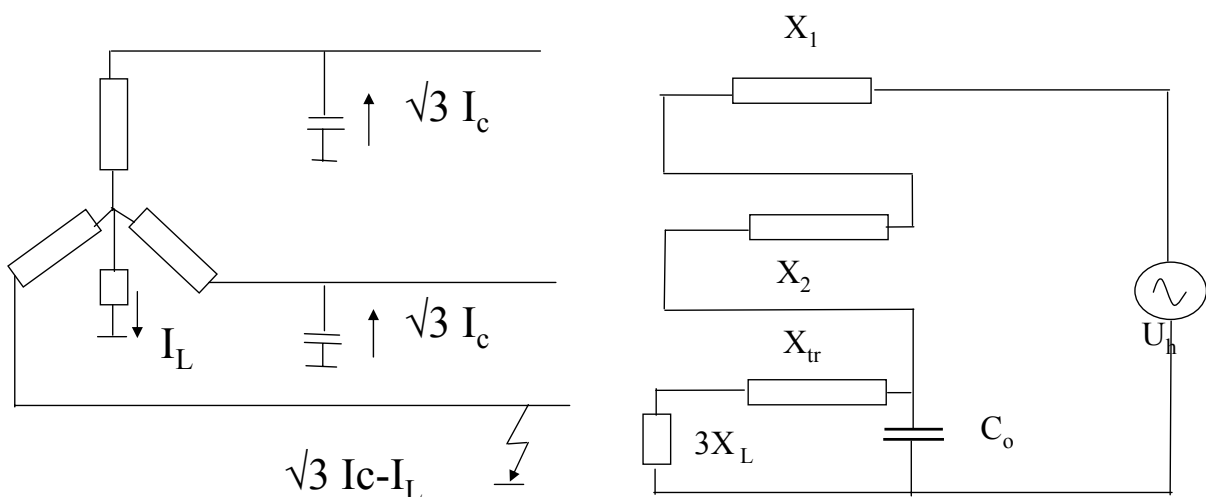
Szigetelt csillagpont értékelése

- **A szigetelt csillagpont előnyei:**
 - ☐ • Kicsi az FN zárlati áram, ezért fennáll az ív spontán kialvásának lehetősége.
 - ☐ • Jelentős valószínűséggel elkerülhetők a hálózati kiesések.
- **Hátrányok:**
 - ☐ • Fennáll az ívelő földzárlat lehetősége, amikor az ép fázisok is meghibásodhatnak,
 - ☐ • Az adott transzformátor(ok)ról ellátott hálózat kiterjedését jelentősen korlátozza a zárlati áram (megengedett érték: 10A 35 kV-os és 15A 20 kV-os hálózaton, ami pl. 35 kV-on 100 km távvezeték-összhosszat, vagy 5 km össz-kábelhosszat jelent)
- Az íves zárlatos állapot nem megengedhető hosszabb időn át.

Kompenzálás

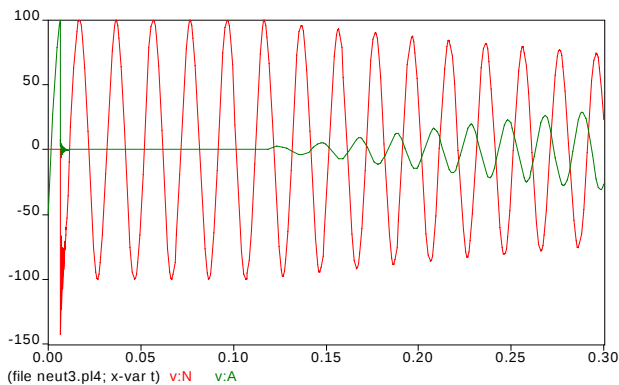
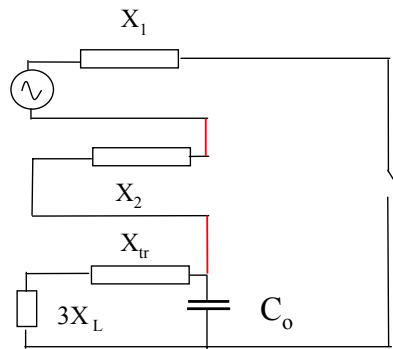
- Az előnyöknek a hátrányok nélküli kihasználását célozza a kompenzálás módszere, vagyis Petersen tekercs beiktatása a csillagpont és a föld közé (a módszer angol elnevezése: resonance grounding). Ez a csillagpont kezelési mód ugyanis
 - - elnyomja a zárlati áram 50Hz-es komponensét,
 - - az ív helyén a visszatérő feszültséget igen enyhévé, lassan emelkedővé teszi, és ezzel csökkenti a hosszú időn át fennálló ívelő földzárlatok valószínűségét.

A kompenzálás fizikája

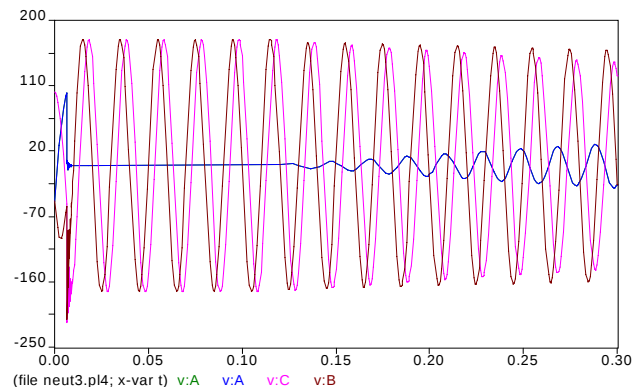


Fontos megjegyezni, hogy a kompenzálás csak az üzemi frekvenciájú áramra vonatkozik, A zárlat által kiváltott tranzien্স nagyobb frekvenciájú árama, vagy a hálózaton egyéb okokból kialakuló felharmonikusok számára a zérus sorrendű rezgőkör nem jelent szakadást.

A kompenzáció hatása a visszaszökő feszültségre



U_0 és a zárlatos fázis feszültsége



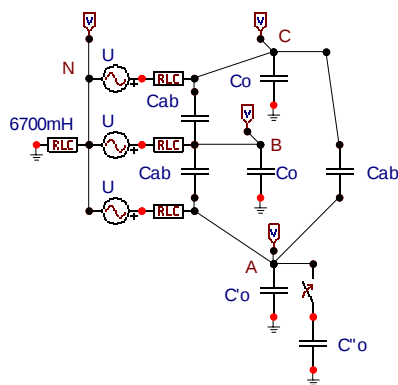
a három fázisfeszültség

Pontos kompenzáció lehetősége

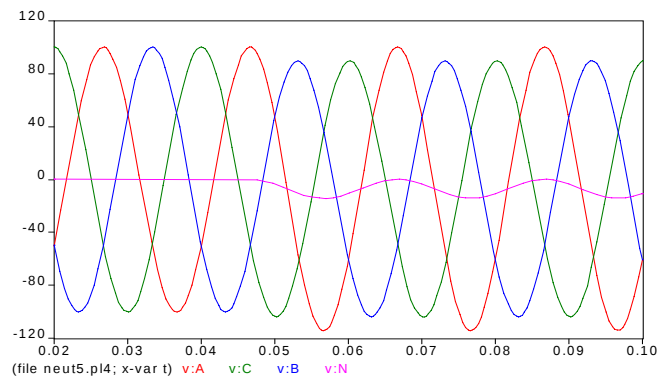
Tökéletesen pontos kompenzációt megvalósítani a gyakorlatban nem lehet, az alábbi okok miatt:

- Mind a Petersen tekercs, mind pedig a hálózat többi komponense veszteséges. Ezért a kapacitív áramnak induktív árammal való kompenzációja csupán elméleti feltételezés, a valóságban ohmos-induktív árammal kellene ohmos-kapacitív áramot kompenzálni, ami maradékáram nélkül nem lehetséges.
- A hálózati feszültségben, illetve áramban jelenlévő felharmonikusokat a Petersen tekercs nem kompenzálja.
- A Petersen tekercs általában nem képes követni a hálózat kapacitásában vezetőek kikapcsolása, bekapcsolása által okozott kismértékű kapacitásváltozásokat.

Kapacitás-aszimmetria hatása kompenzált hálózaton



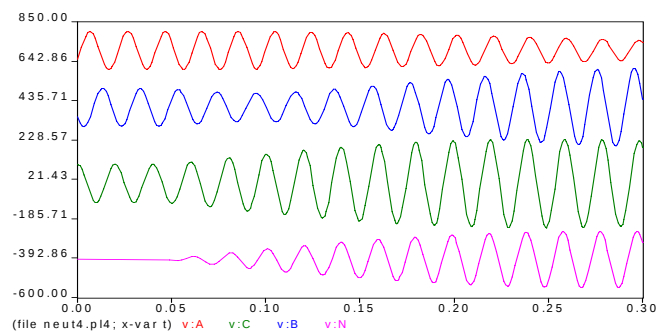
a. hálózat



b. fázisfeszültségek és U_0

c. fázisfeszültségek és U_n a Petersen tekercs beiktatott állapotában

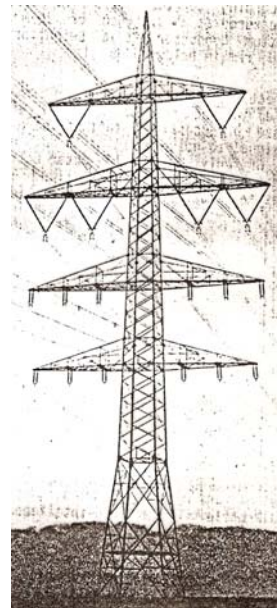
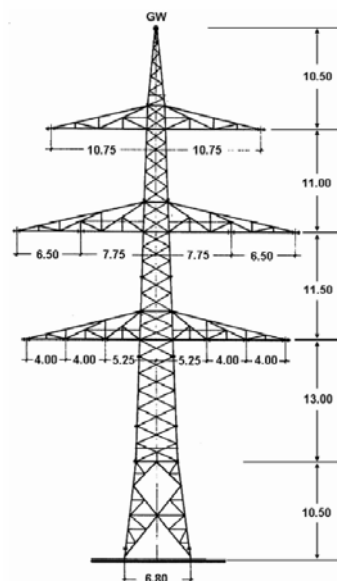
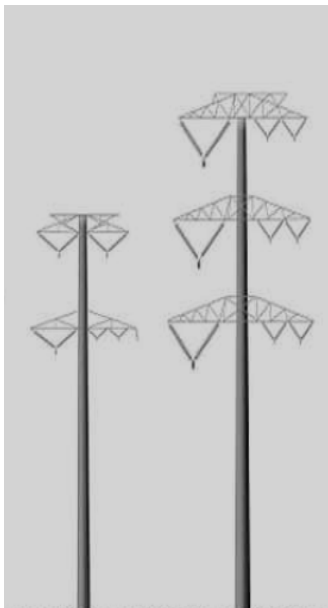
Javaslat: túlkompenzáció



Tanulság:

- Az esetleges kapacitás-aszimmetria üzemi frekvenciájú, soros feszültséget okoz a zérus sorrendű áramkörben.
- Petersen tekercs beiktatása esetén a zérus sorrendű hálózat az üzemihez közeli frekvenciájú rezgőkörre válik, tehát az esetleges kapacitás-aszimmetria rezonanciát okoz, ami mindhárom fázisban veszélyeztetheti a szigetelést.
- Ez a jelenség nem kapcsolódik földzárlathoz, folyamatosan fennállhat. Ez a körülmény a jelenség veszélyes voltát kiemeli.
- A zérus sorrendű rezgőkörbe más módon is kerülhet soros üzemi frekvenciájú feszültségforrás. Erre példa a kombinált távvezetékek konstrukciójánál figyelembe veendő csatolás hatása.

Nagyfeszültségű és közepfeszültségű rendszereket egyaránt tartalmazó, kombinált távvezetékek



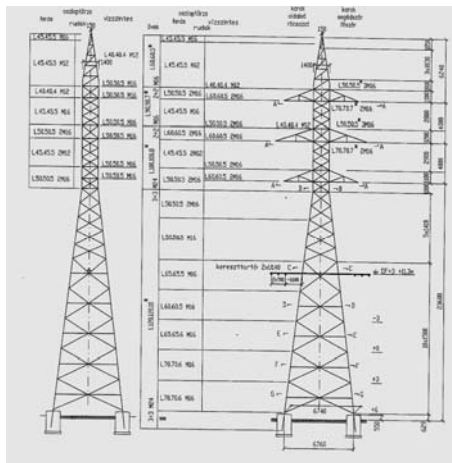
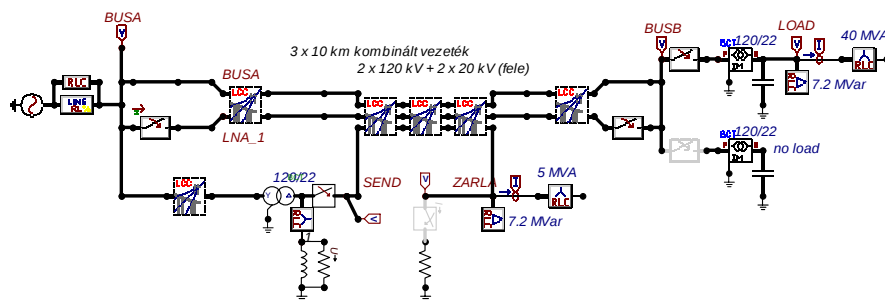
Miért kedvező kombinált vezetékek létesítése?

- Segít megoldani az új vezetékjog megszerzésével kapcsolatos problémákat.
- Hasznos a környezetvédelem (vizuális hatás, élettani hatás, stb.) szempontjából.
- Kompakt megoldásokat igényel, ez kedvezőbb természetes teljesítményt eredményez.

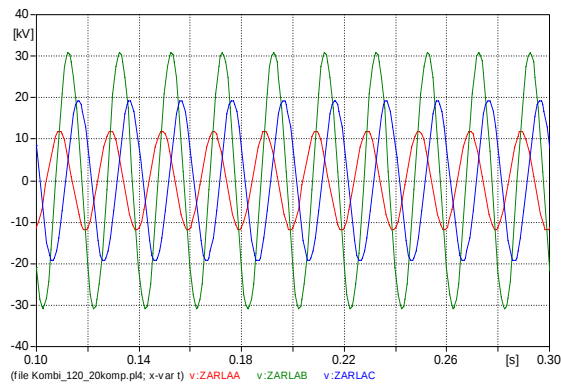
Túlfeszültség- és ívvédelem szempontjából milyen újszerű kérdések merülnek fel?

- A nagy oszlopmagasság miatt a közép feszültségű rendszer villámvédelmi helyzete romlik: nagy mértékben nő a visszacsapások száma (burkolt vezetékek!)
- A nagyfeszültségű rendszerrel való elektromágneses csatolás miatt a közép feszültségű rendszerben jelentős zérus sorrendű feszültség ébredhet.
- Kompenzált hálózaton a csatolásból eredő zérus sorrendű feszültség rezonanciafeszültséget okozhat (túlfeszültségkorlátozók!)
- Zárlat hatására bekövetkező háromfázisú kikapcsoláskor intermittens szekunder ív képződhet, ami veszélyezteti a visszakapcsolás sikerességét.

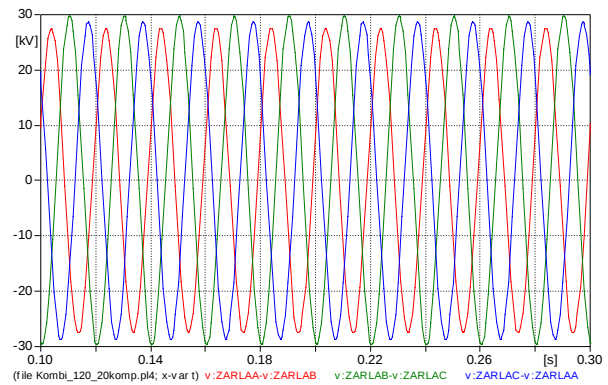
Szimulációs esettanulmány



Fázis- és vonali feszültségek a 20 kV-os rendszerben

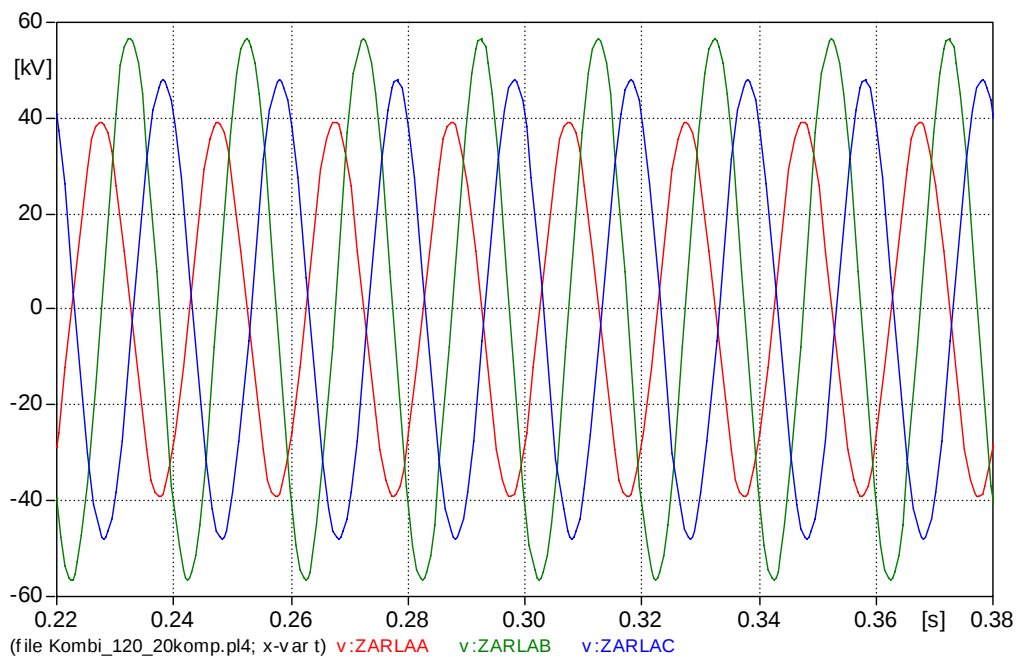


fázisfeszültségek

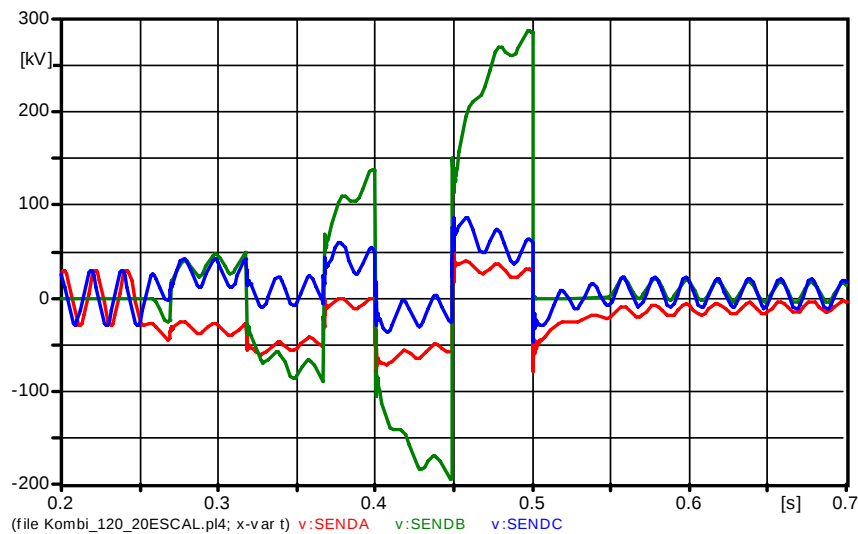


vonali feszültségek

Kis terhelés melletti rezonanciafeszültségek 120 és 20 kV-os kombinált vezeték 20 kV-os rendszerén



Zárlati kikapcsolást követő feszültségeszkaláció 120 és 20 kV-os kombinált vezeték 20 kV-os rendszerén

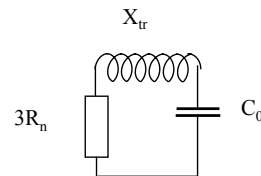


Megoldások:

- Fáziscserék.
- A vezetékek helyének variálása
- Rendszerek közötti távolságok variálása
- Egyedi vizsgálatok.
- Burkolt közép feszültségű rendszeren ívvédelmi szerelvények a kombinált oszlopokon.
- Túlfeszültségkorlátozó-paraméterek megfontolt kiválasztása.

Hosszú földelés

- Ennél a csillagpontkezelési módszernél a csillagpontot ellenálláson keresztül földelik, aminek kettős célja van:
- az ívkialvás után C_0 -ban maradt töltés gyors kisütése, tehát a zérus sorrendű feszültség lecsengésének elősegítése,
- kellően nagy földzárlati áram előidézése ahhoz, hogy a védelem biztonságosan érzékelhesse a zárlatot.
- A hosszú földelést megvalósító R_n neutrális ellenállásra vonatkozó előírás:
- $R_n < 0.8 X_{C_0} = 0.8 \cdot 1 / \omega C_0$
- Elhanyagolva a transzformátor X_{tr} soros reaktanciáját, a kondenzátor kisülésének időállandója $R_n = 0.8 X_{C_0}$ felvétellel
- $T = 3 R_n C_0 = 3 \cdot 0.8 C_0 / \omega C_0 = 7.64 \text{ ms} < 10 \text{ ms}$,
- Fenti időállandóval a zérus sorrendű feszültség 10 ms,
- vagyis egy félperiodus alatt eredeti értékének 27%-ára csökken.



A CSILLAGPONT-KEZELÉSI MÓDSZEREK ÖSSZEFOGLALÁSA

	A CSILLAGPONTKEZELÉS MÓDJA			
	SZIGETELT CSILLAGPONT	KOMPENZÁLÁS	HATÁSOS FÖLDELES	HOSSZÚ FÖLDELES
IVES ZÁRLAT	MAGÁTÓL KIALSZIK AZ IV		VISSZAKAPCSOLÓ AUTOMATIKA TISZTÁZ	
IVELŐ FÖLD-ZÁRLAT	FELLÉPHET	FELLÉPHET, DE NEM KÁROS	NEM	ALAKULHAT KI
FÉMES ZÁRLAT	A HÁLÓZAT TOVÁBB ÜZEMELTETHETŐ		A HIBÁS VEZETÉKET A VÉDELEM LEKAPCSOLJA	
FÖLDZÁRLAT-ÉRZEKELÉS	KÜLÖNÖSEN SZELEKTIV ÉRZEKELÉSRE VAN SZÜKSÉG		A KÖZÖNSÉGES ZÁRLATI VÉDELEM MŰKÖDIK	
TRANZIENS FESZ. CSÚCS	MAX. $2.5 U_V$ *		MAX $1.9 U_V$ **	$(1.9-2.5) U_V$
VISSZASZÖKŐ FESZ.	U_0 MIATT NAGY AMPL	IGEN ENYHE	SZIGORÚ (AZ IV MAGÁTÓL NEM ALSZIK KI)	
BEFOLYÁSOLÁS	JELENTÉKTELEN		IGEN NAGY	CSEKÉLY, DE VAN
A HÁLÓZAT MEGENGEDETT KITERJEDESE	IGEN KORLÁTOZOTT	KORLÁTOZOTT	KORLÁTLAN	

* 0,5-ről 1,5-re kell ugrania =1, túllengés=1; 0,5+1+1=2,5

** 0,5-ről 0,8, 1,5=1,2-re kell ugrania=0,7, túllengés=0,7;
0,5+0,7+0,7=1,9