



Fázistolós (kereszt szabályozós) transzformátorok és hálózati szerepük

Csépes Gusztáv, Diagnostics Kft.



Tartalomjegyzék

1. Előzmények, téma alualítása
2. Fázistolós (PST) trafók működése
3. PST hálózati szerepe
4. Konklúziók



- A villamos energia piac **liberalizálása**, az energia termelés és átvitel **szétválasztása** jelzi, hogy szükség van egy eszközre, ami az adott **hálózatok közötti áramlást szabályozza**.
- A fázistolós trafók (**PST**) **erre a célra jól megfelelnek**, ezért a **jövőben egyre több** ilyen egység fog üzembe kerülni.
- **Több PST kerül üzembe**, így érdemes áttekinteni, mint különleges trafót.
- Alapvetően a **PST műszakilag elég egyszerű**: adott szöget biztosít a primer és szekunder kapcsok között.
- A **PST** egy nagyon **hatékony eszköz** a **wattos teljesítmény áramlás szabályozására**.
- Rendes körülmények között üzemben ezt a szöget **az OLTC-nek megfelelő lépcsőkben** lehet változtatni.

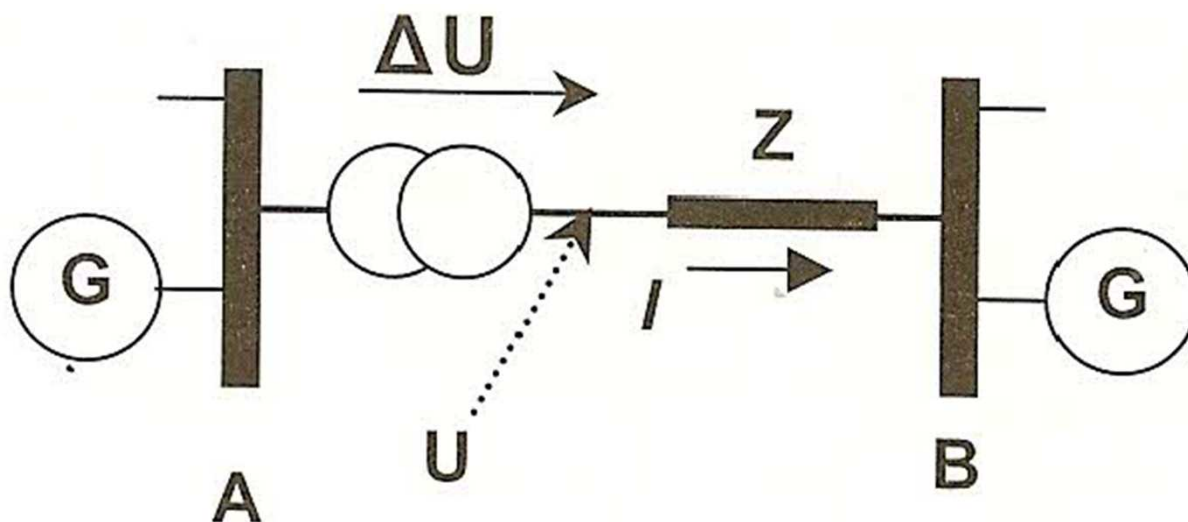
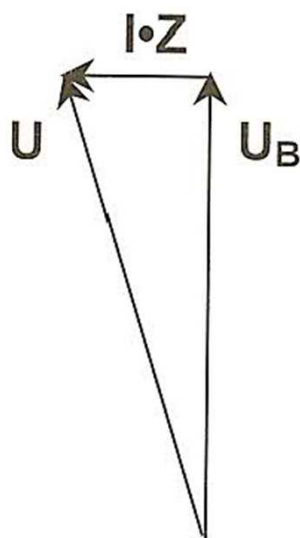
PST előadás aktualitása

- **Magyar hálózaton** is vizsgálták már a szükségesét, de közvetlen előzmény: **OVIT felszerelt 2 egységet** a német-cseh határon.
- A szokásos szabályozós trafó neve igazán „**hossz szabályzós**” trafó lenne.
- **Hossz szabályozós trafó:** áttétel változtatásával feszültségérték változtatás, de **fázisszög nem változik**.
- Ha hurkolt hálózatoknál a feszültség szabályozás mellett (meddő szabályozás) szükség van a wattos teljesítmény áramlás szabályozására, akkor a **hossz szabályozás kiegészül kereszt szabályozással**.
- PST „elmélete” régóta ismert, de nagyobb igény most jelentkezett,
- Ha „**szabályozó tekercs**” nem saját fázisáról kap gerjesztést, akkor a **fázisszög is változik, eltolódik: Phase Shifting Transformer=PST**.

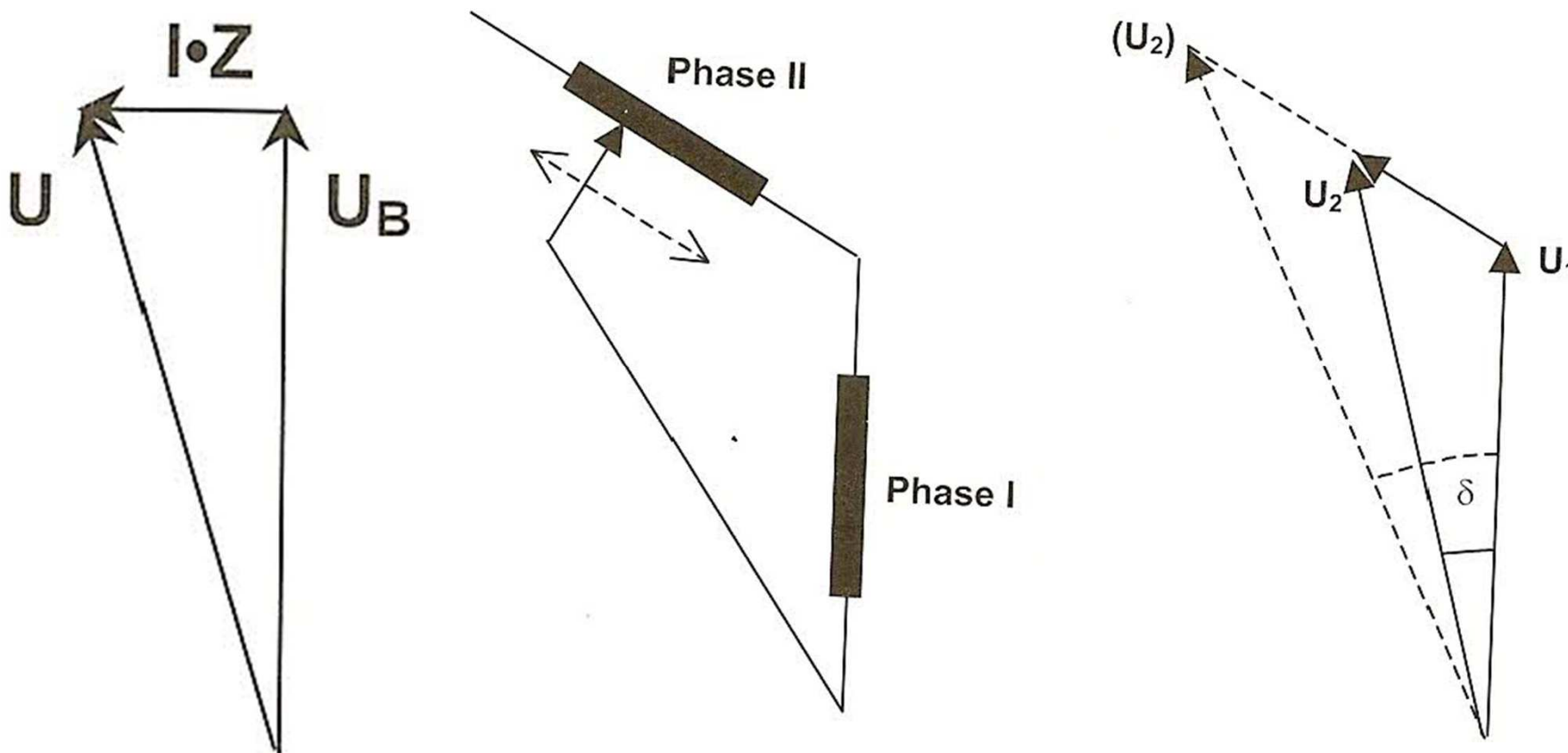


- Több elnevezés: régen a magyar terminológia: **kereszt szabályozó**.
- Használták még a fázisszög szabályozást, most pedig fázis tolós szabályozó (Phase Shifting Transformer, PST).
- **Két fő célból alkalmazzák a PST-t:**
- Teljesítmény áramlás szabályozás **két nagy független hálózat között**.
- **Terhelés kiegyenlítés**, amikor a hálózati rendszerek több ponton össze vannak kapcsolva, amikor létezik egy hurok, amikor a párhuzamos ágak impedanciái nem kívánatos áramlásokat hoznak létre.

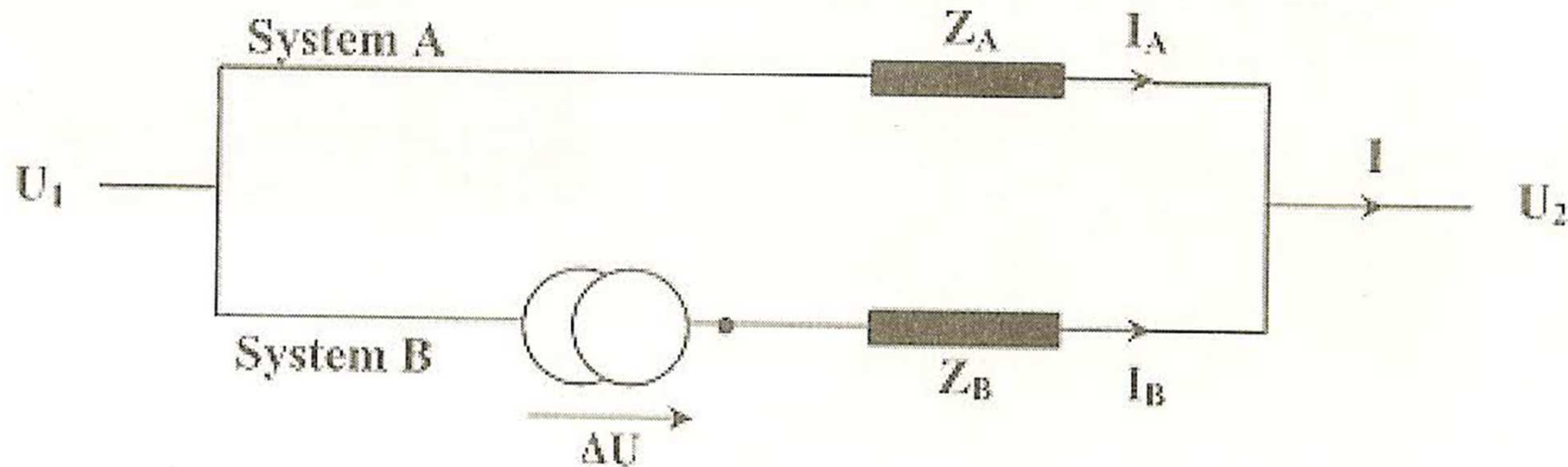
Példa teljesítmény áramlásra: „A” és „B” két erős hálózat, Z impedanciájú vezetékkel vannak összekötve. Ahhoz, hogy A-ból B-be történő energia átvitel legyen ΔU feszültségnek Z bal végétől jobb vége felé kell mutatnia. Ha Z valós része elhanyagolható, teljesítmény tényező=1, akkor egy ideális PST (nincs impedanciája), ΔU feszts tesz be Z -vel sorosan. Ha A és B közötti feszültség egyenlő $U_A=U_B$, a szabályozott delta $\Delta U - I \cdot Z=0$, és az alábbi vektordiagramot kapjuk. Tehát **kikényszerítjük az A-ból B-be áramlást.**



A fázisszögek különbözőek lehetnek a „hozzáadott fázis irányától” függően: „quadrature” és „nem quadrature”.

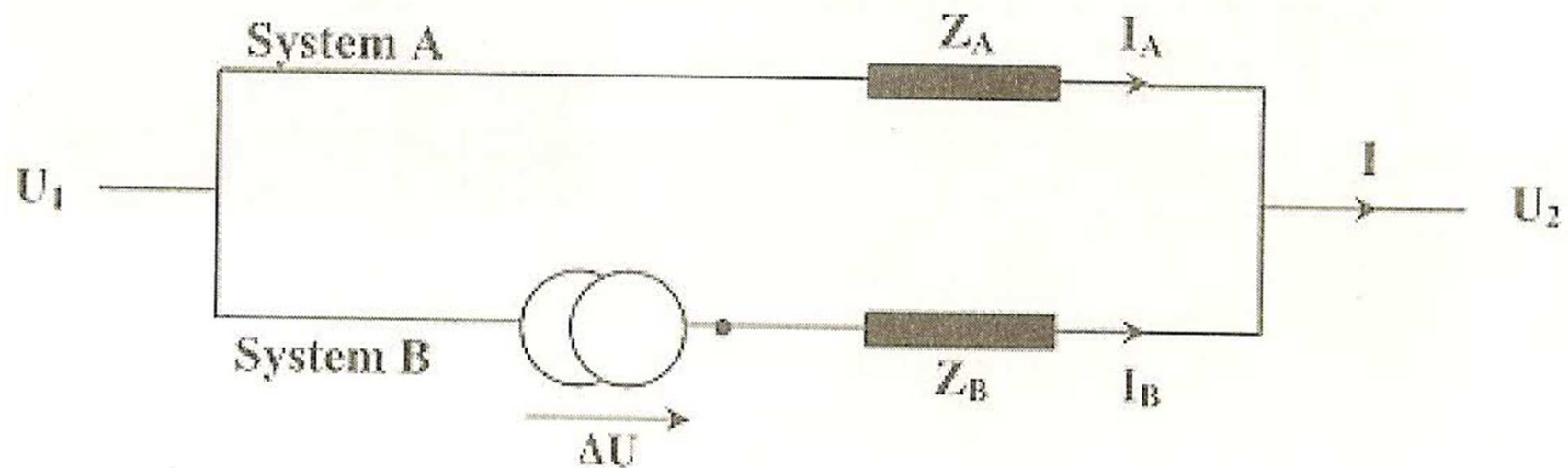


- Példa **két párhuzamos vezetéken** átvitt teljesítmény áramlás befolyásolására:
- Két rendszer **két ponton van összekötve**, az energiaáramlás arányát a két vezetéken a Z_A és Z_B határozzák meg.
- Ha ez megoszlás **nem megfelelő**, akkor **PST a B ágba, ΔU feszts tesz be Z_B -vel** sorosan növelve I_B áramot, csökkentve I_A áramot.



Számszerűsítve:

Ha **Za és Zb közötti különbség elég nagy**, pl. $Z_a=30\text{ohm}$, $Z_b=300\text{ ohm}$ (1:10 az arány). Impedanciák valós értéke elhanyagolva, rendszer fesz. 800kV, az átvihető teljesítmény (balról jobbra) 1000MVA, a teljes áram I ekkor 722A. PST nélkül ($\Delta U=0$) a számítás szerint $I_a=656\text{A}$ és $I_b=66\text{A}$, **azaz 9 és 91% a megoszlás.**



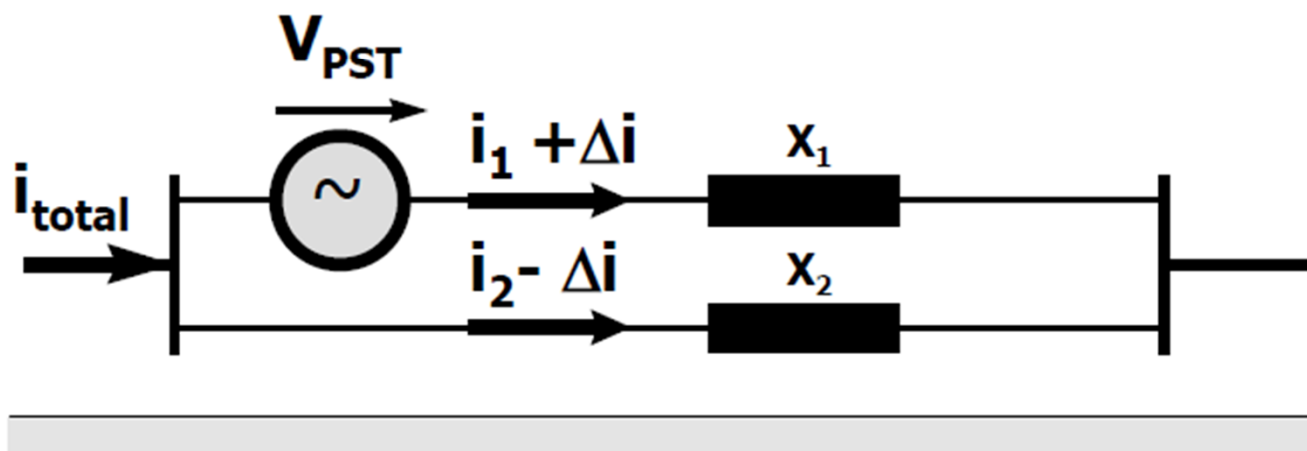
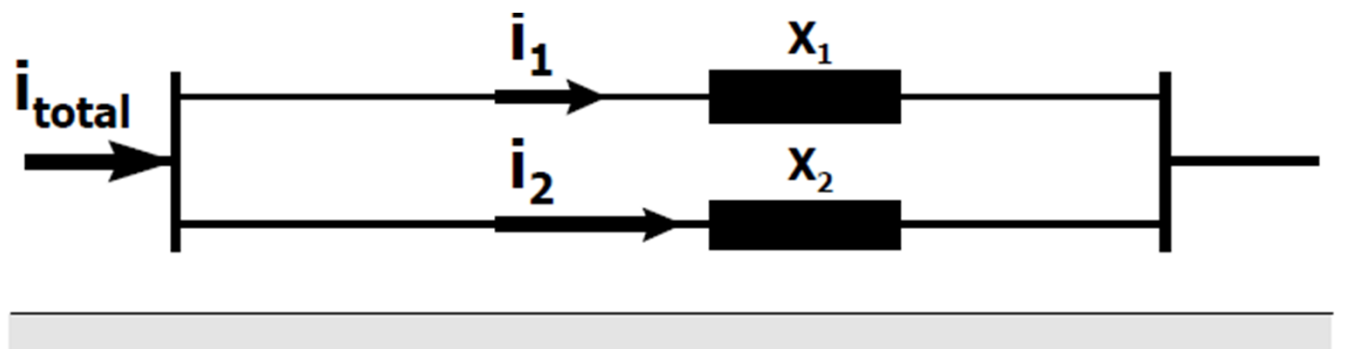
- Legyen pl. az árammegoszlás a **két rendszer között 50%: az áram=361A**, ez 10830V feszessést okoz Z_a -án, 108300 V-ot Z_b keresztül.
- A „B” rendszerbe tett járulékos „ ΔU ” feszültség a Z_b keresztül megnöveli 66A-ról 361A-ra az áramot, kompenzálja a 97470 V különbséget a két feszültségesés között.
- A PST szolgáltatja ezt a járulékos „ ΔU ” feszültséget. Ha **Z_b lenne kisebb**, mint Z_a , akkor **ellenkező előjelű** szögfordításra lenne szükséges.
- Meg kell jegyezni, hogy valóságban a **PST hatással van mind az aktív, mind a reaktív** teljesítmény áramlásra.
- A PST-nek **bizonyos lépcsőkben tudni kell változtatni a szöget**, ill. a teljesítmény áramlást.
- A PST **fáziseltolás hoz létre a primer** (forrás, source) és a **szekunder** (terhelés, load) oldal között.
- Egészen különleges esetektől eltekintve, a **cél a komplex hálózati áramlás szabályozása**.



- **Két párhuzamos vezeték** közti árammegoszlás szabályozása egy nagyon egyszerű eset.
- Normál esetben az **áram megoszlás** a két vezetéken a vezetékek **impedanciájától függ.**
- X1 és X2 közötti megoszlás nagyon **gazdaságtalan lehet**, ha az **impedanciák különbözőek (egyik alul, másik túlterhelődik).**
- Egy járulékos **feszültség forrás beadásával („ ΔU ”)** köráramot lehet generálni, amely kiegyenlíti a korábbi nagy árameltéréseket.
- Esetünkben egy előre **mutató fázisú külső „ ΔU ” feszforrás** kiegyenlítette az áram különbségeket, így növelte az eredő átviteli képességet.



Két párhuzamos vezeték esetén az I_{total} I_1 és I_2 megoszlású lesz az X_1 és X_2 ellenállású távvezetéken, ha van PST akkor beiktatódó V_{pst} feszültség hatására ez az eloszlás megváltozik.

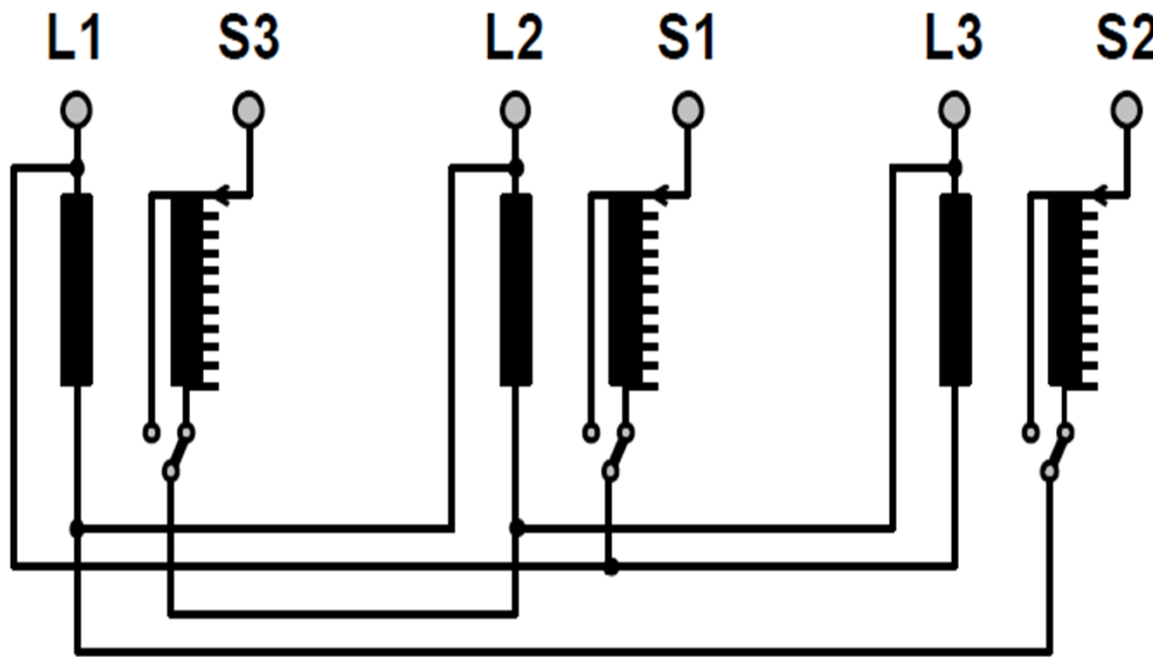


- Megjegyzendő, hogy a főleg **induktív vonali impedanciához** egy **ellenkező fázisú „ ΔU ” feszültség** megváltoztatja a feszültséget, akkor **változik a meddő teljesítmény is**.
- Ha merőleges irányú a („ ΔU ” beadott feszültség (**quadrature**), olyan fázistolás lép fel, amely befolyásolja a wattos teljesítmény áramlást.
- A **PST trafók több szempont alapján** lehet **osztályozni**: szimmetrikus vagy nem szimmetrikus; egy vasmagú vagy kettő; egy tankban van vagy kettőben, **„quadrature” és „nem quadrature”**.
- „Quadrature” (merőleges fázisú) típus esetén a fáziseltolást okozó beadott **feszültség merőleges** egy egyik kapcsón a vonali feszültségre.
- Két vasmag esetén két tank szokott lenni, de nem minden esetben.

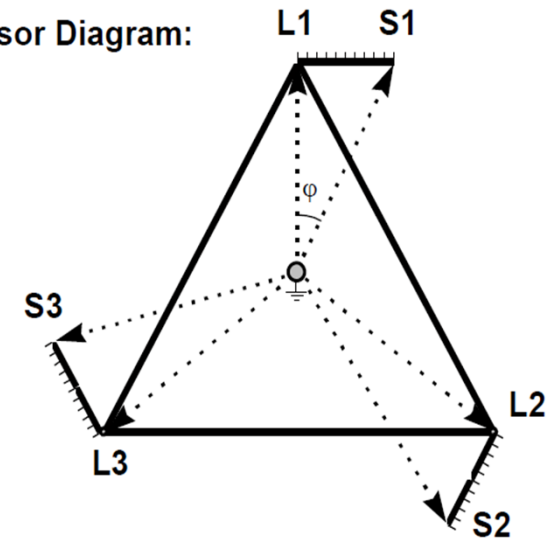


Nem szimmetrikus, egy vasmagú, quadrature" típusú PST:

- Legegyszerűbb: előnye, hogy nem kell gerjesztő egység. De az OLTC, szabályozó tekercs közvetlenül ki van téve a rendszer behatásának, ezért költséges a túlfeszültség védelmi képesség megoldása. Jó, hogy a maximális fázisszög jelentős értékű lehet. Látható, hogy itt az L1 fázishoz az L2-L3 irányú „ ΔU ” feszültség kerül beadásra, amely merőleges az L1 feszültségre.

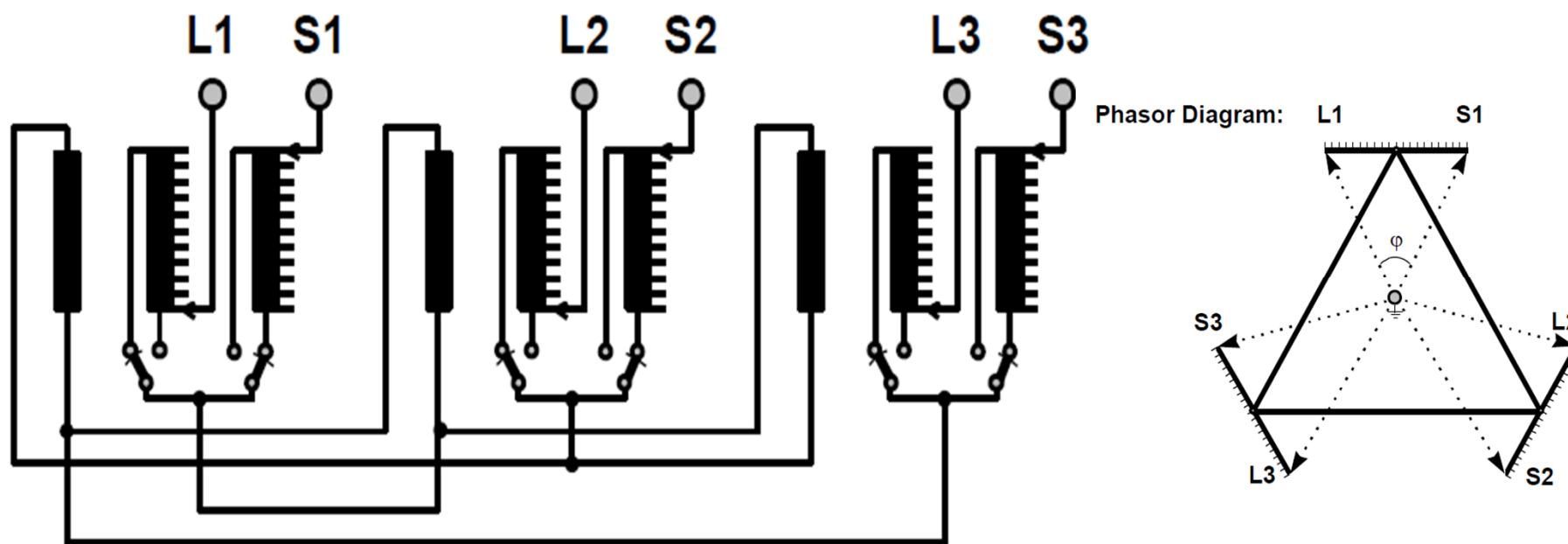


Phasor Diagram:

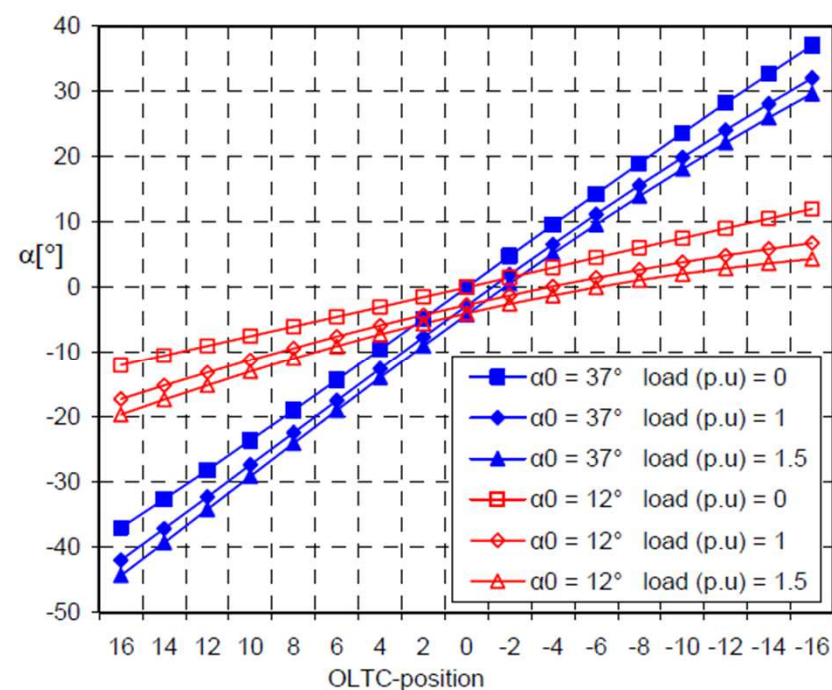
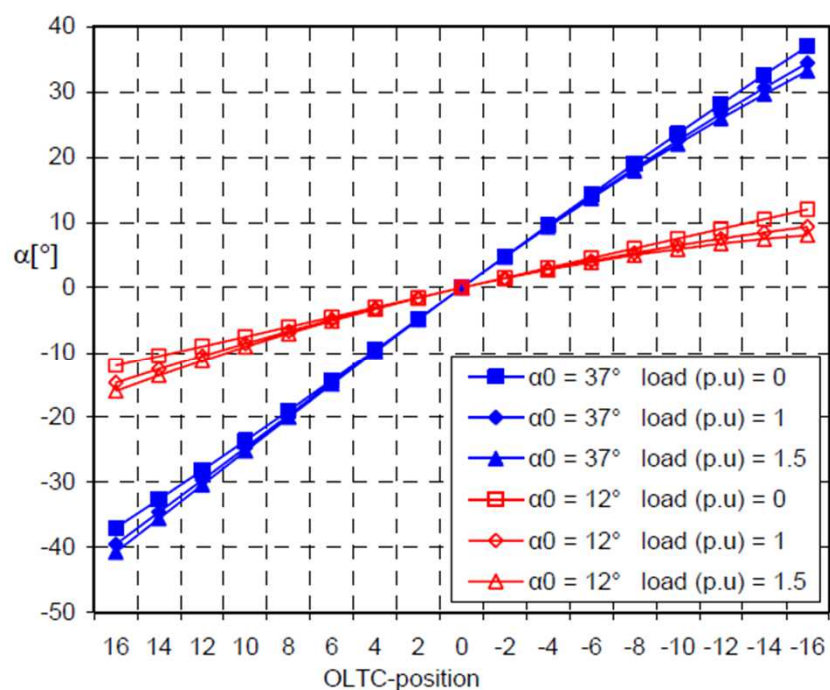


Nem szimmetrikus, egy vasmagú, quadrature” típusú PST:

Az előbbi eseten alapszik az egy vasmagú, de szimmetrikus eset egy második szabályozó tekercessel és OLTC-vel. Itt még nagyobbak a szabályozási lehetőségek.



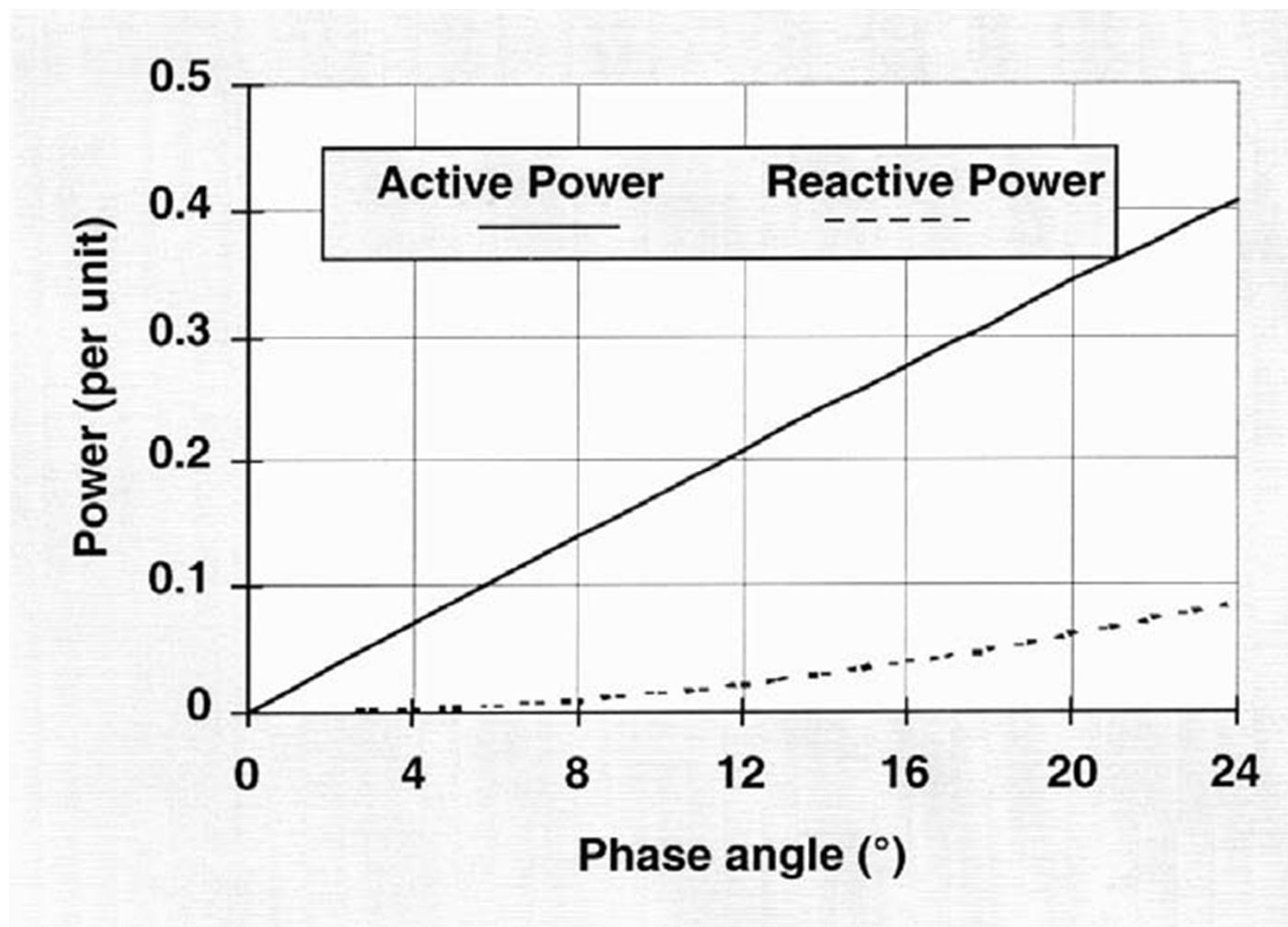
A fázisszög és a szabályozott teljesítmény a fokozatkapcsoló állásának függvényében



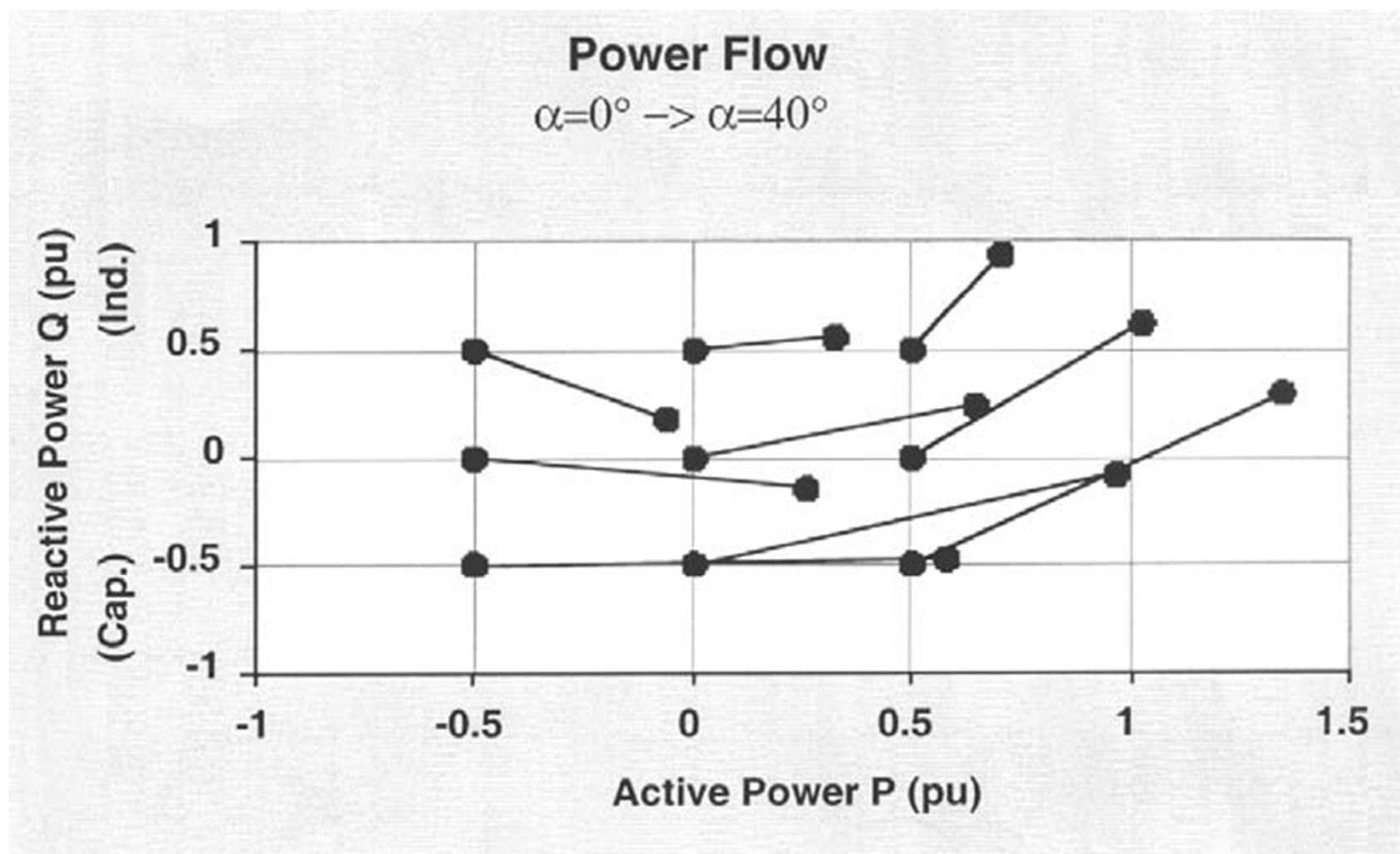


PST szabványok: C57.135.2001 PST; IEC 62032 PST

Guide for the application, specification, and testing of phase-shifting transformers



PST szabvány: meglepően részletes (IEC 60076-hoz képest)



PST szabvány: meglepően részletes

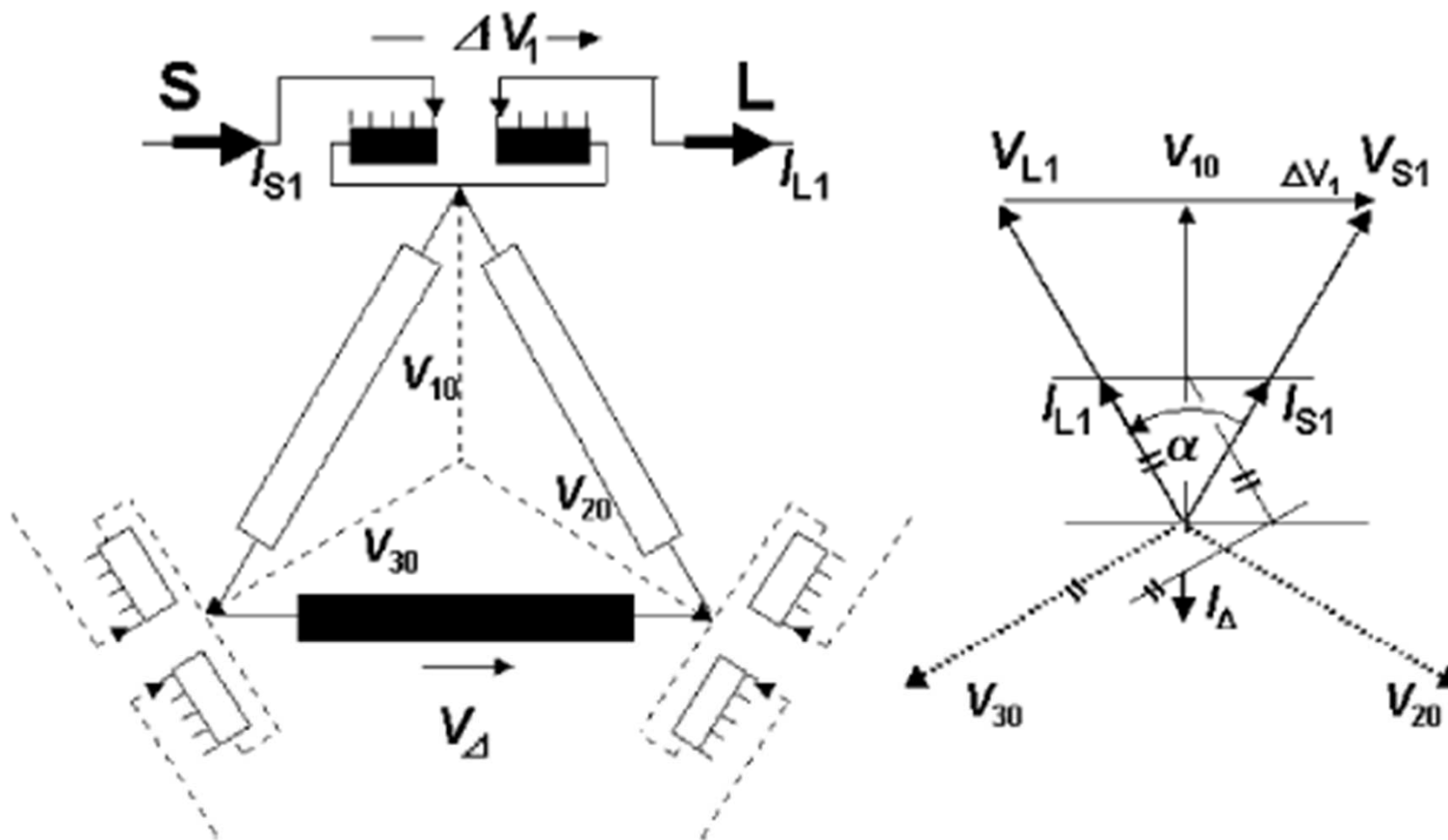
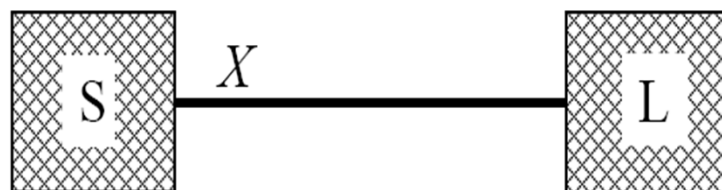


Figure 7a—Phasor diagrams for no-load condition

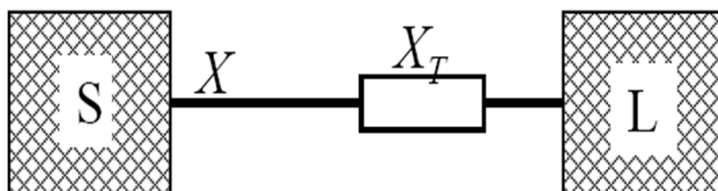
A fázistolás szög és a szabályozott teljesítmény az alábbi elvi ábrákon követhető:



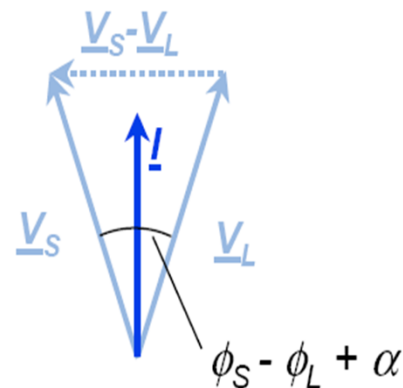
$$P = \frac{V_S V_L}{X} \sin(\phi_S - \phi_L)$$

Phase Shifting
Transformers are Power
Flow Controllers

The phase angle between
two systems determine the
power exchange



$$P = \frac{V_S V_L}{X + X_T} \sin(\phi_S - \phi_L + \alpha)$$

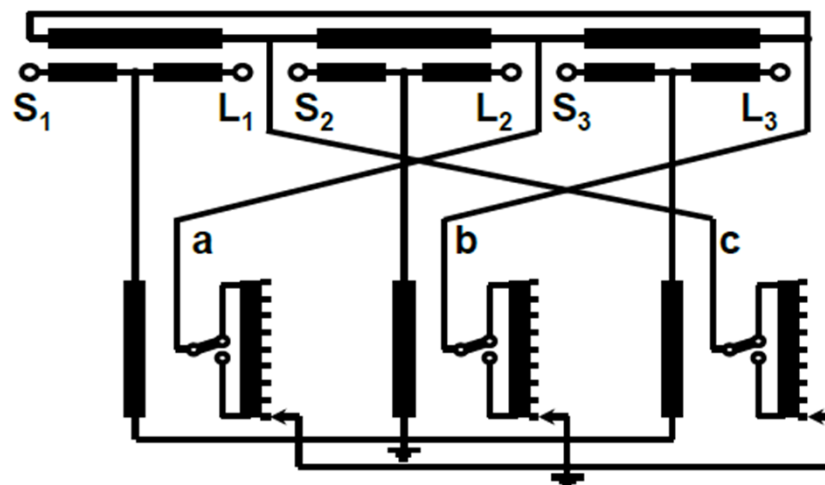


Tipikus esetek számítása:

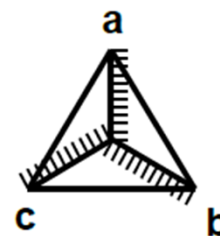
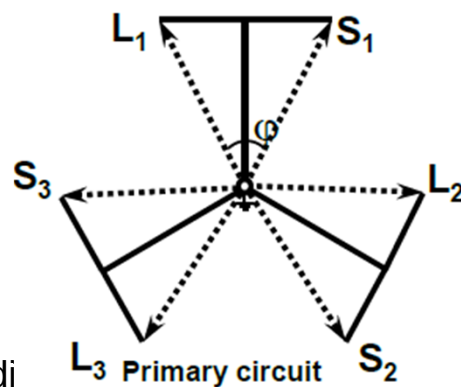
- **300 MVA átmenő teljesítmény, 220/220 kV +/- 10°:** Egyenértékű eltolási teljesítmény = $300 \text{ MVA} \times 2 \sin(\alpha/2) = 52 \text{ MW}$
- **Tauern trafó: 600 MVA átmenő teljesítmény, 232/232 kV +/- 35°:**
- Egyenértékű eltolási teljesítmény = $600 \text{ MVA} \times 2 \sin(\alpha/2) = 360 \text{ MW}$
- **250 MVA átmenő teljesítmény, 128/128 kV +/- 25°:**
Egyenértékű eltolási teljesítmény = $250 \text{ MVA} \times 2 \sin(\alpha/2) = 108 \text{ MW}$

Az USA-ban leggyakrabban használt kivitel: szimmetrikus, quadrature.

Winding Arrangement and Connections:



Phasor Diagram:

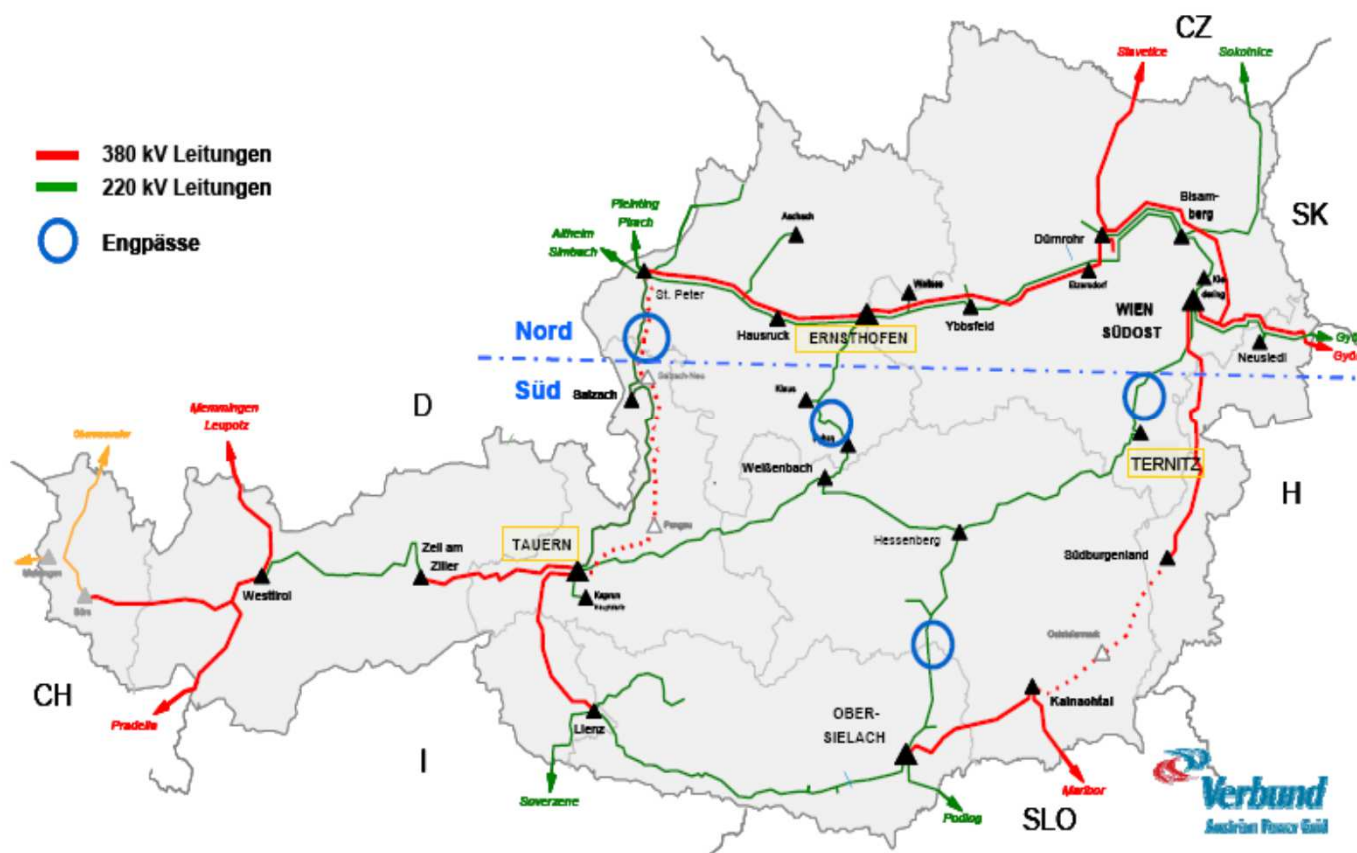




Egy angliai quadrature PST: Angliában több ezer MVA van beépítve, **északról délre történő áramlást** kell biztosítani. Első PST **1969-ben** (275kV), 1997-ben már 400kV is. **Északon termelés, délen a fogyasztás nagy**, közben sok kis távvezeték. Környezetvédelmi okok miatt új távvezeték nehezen épülhet.

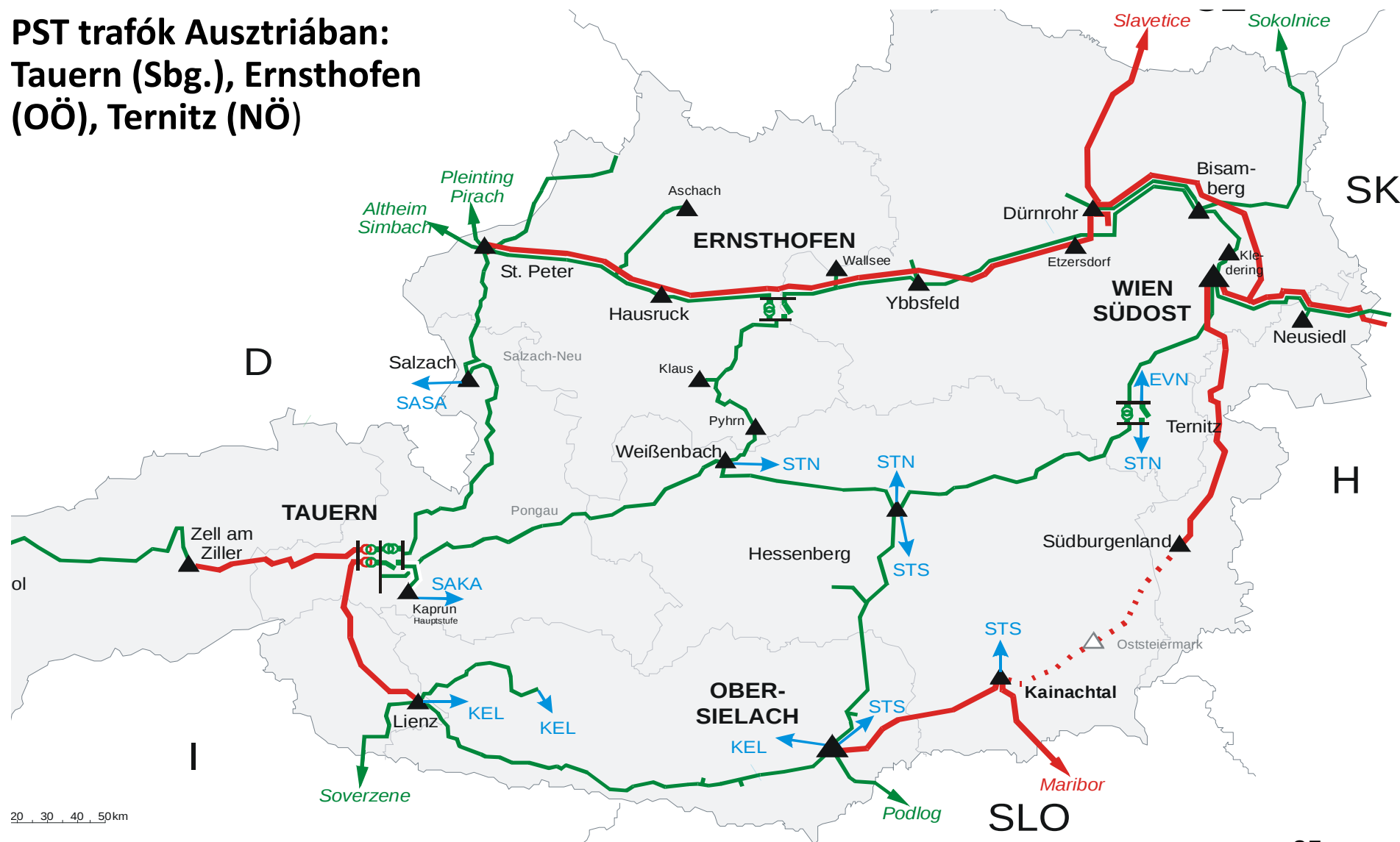


Osztrák PST esete: északon sok energiatermelés, délen nagy a fogyasztás igény, 3 távvezeték-folyosó bonyolítja le az energia áramlást. Sok túlterhelés, kisesés. Három helyre PST, egyik Kaprun Tauern.



PST trafók Ausztriában
Tauern (Sbg.)
Ernsthofen (OÖ)
Ternitz (NÖ)

PST trafók Ausztriában: Tauern (Sbg.), Ernsthofen (OÖ), Ternitz (NÖ)





PST Ausztriában

Az osztrák Tauern alállomás (Kaprun) fázistolós trafója 600 MVA átmenő teljesítményű, 232/232 kV-os, **két tartányban elhelyezett, két vasmagos, forrás ill. terhelési oldalakra nézve szimmetrikus feszültségű, $\pm 35^\circ$** fázistolási lehetőség, csillagponti ± 28 fokozatú fokozatkapcsolóval.

Tauern trafó főbb paraméterei:

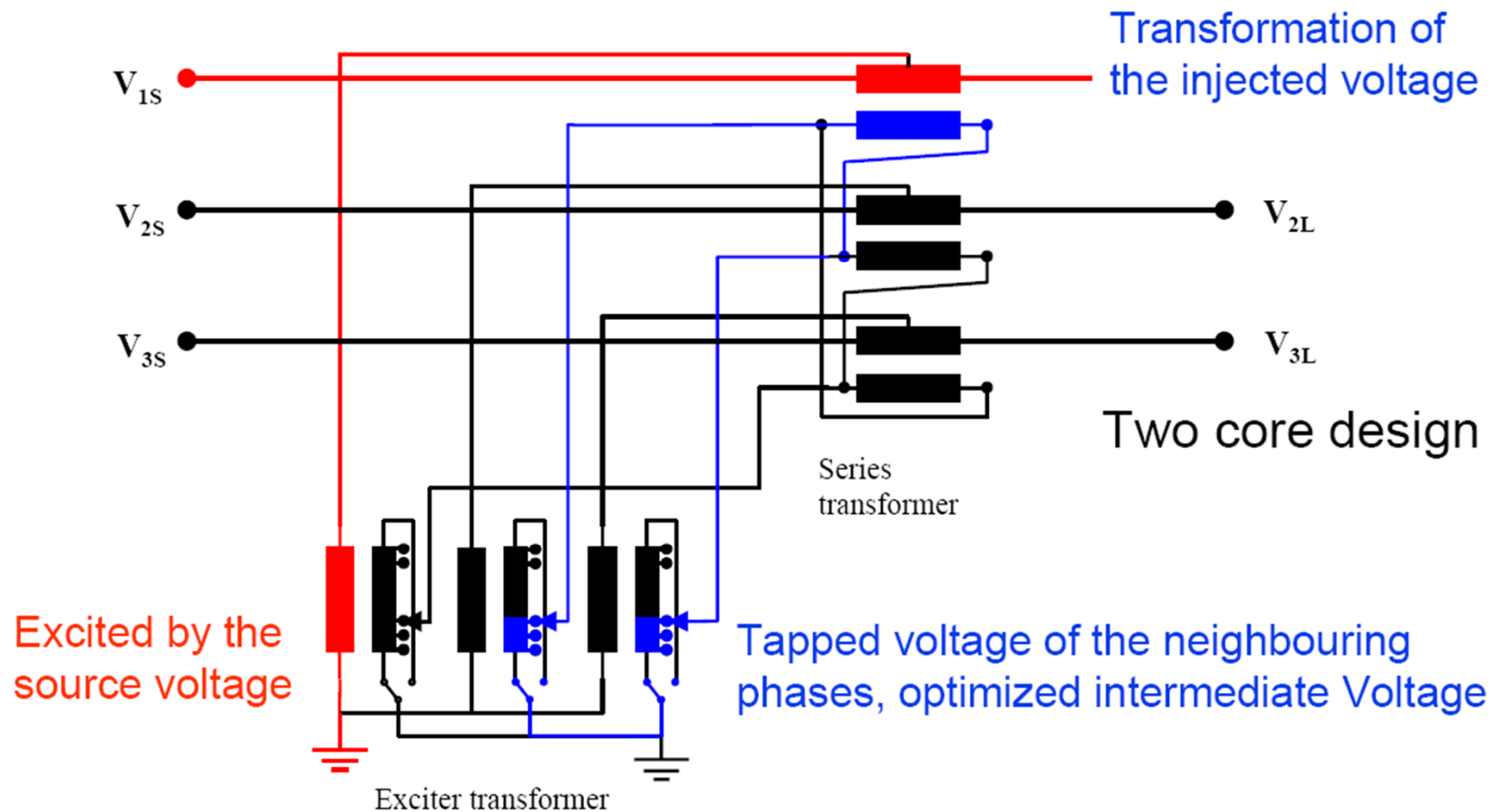
- Átmenő teljesítmény: 600 MVA
- Feszültség: 232/232 kV
- Fázistolási tartomány: $\pm 35^\circ$
- Fokozatszám: ± 28 (összesen 57 pozíció)



A Tauern PST főbb adatai

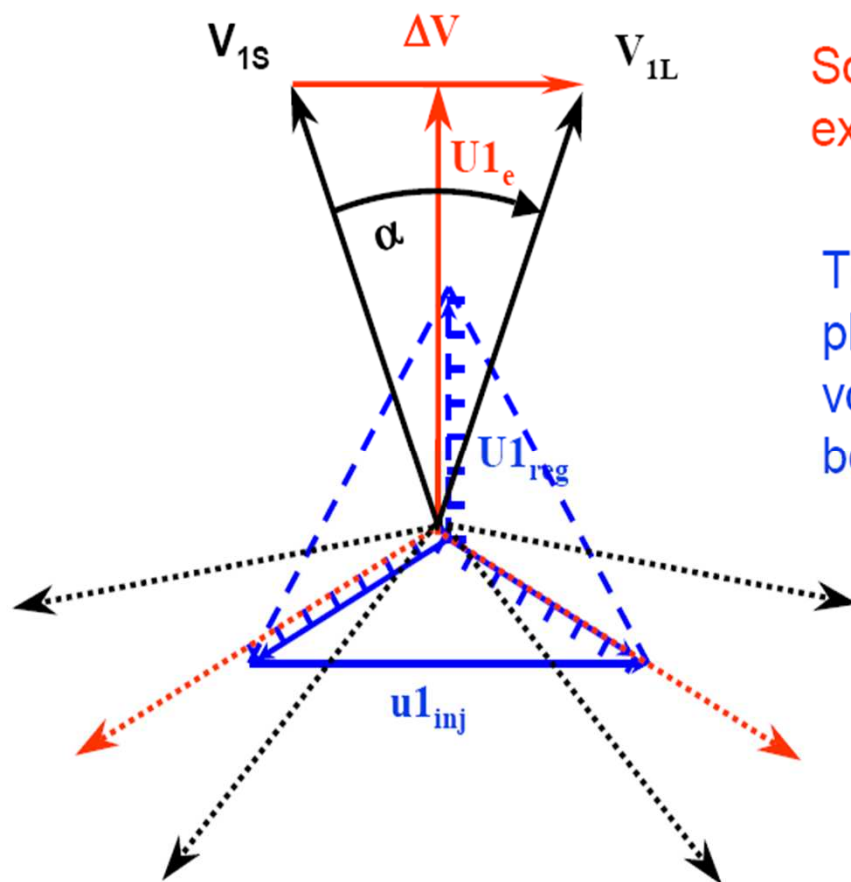
- Throughput Power 600 MVA
 - Physical Size 360 MVA (S) + 344 MVA (E)
 - Rated Voltages 232 kV / 232 kV
 - BIL /SIL 950 kV / 750 kV
 - Phase Angle Regulation $\pm 35^\circ$ in ± 16 steps
 - Transport Dimensions 11.9 x 3.94 x 4.47 m
 - Transport Weight heaviest part 260000 kg
 - Total Weight 852000 kg
 - No-Load losses 0...105 kW + 98...88 kW
 - Load losses 870...875 kW + 0....806 kW
 - Impedance 14.5% + 0...4.75% rel. 600 MVA
-
- Advance-Retard-switch in the series transformer, coarse/fine tap changer in the exciter transformer

Tauern osztrák PST egyszerűsített elvi kapcsolási rajza: két vasmagos, két tankos, szimmetrikus





A feszültségek vektorábrája az alábbi ábrán látható, szimmetrikus, +/- 35 fok szabályozási szög:



Source voltage U_e
excites the Exciter transformer

Tapped voltage of the neighbouring
phases, optimized intermediate
voltage to utilize the tap changer
best

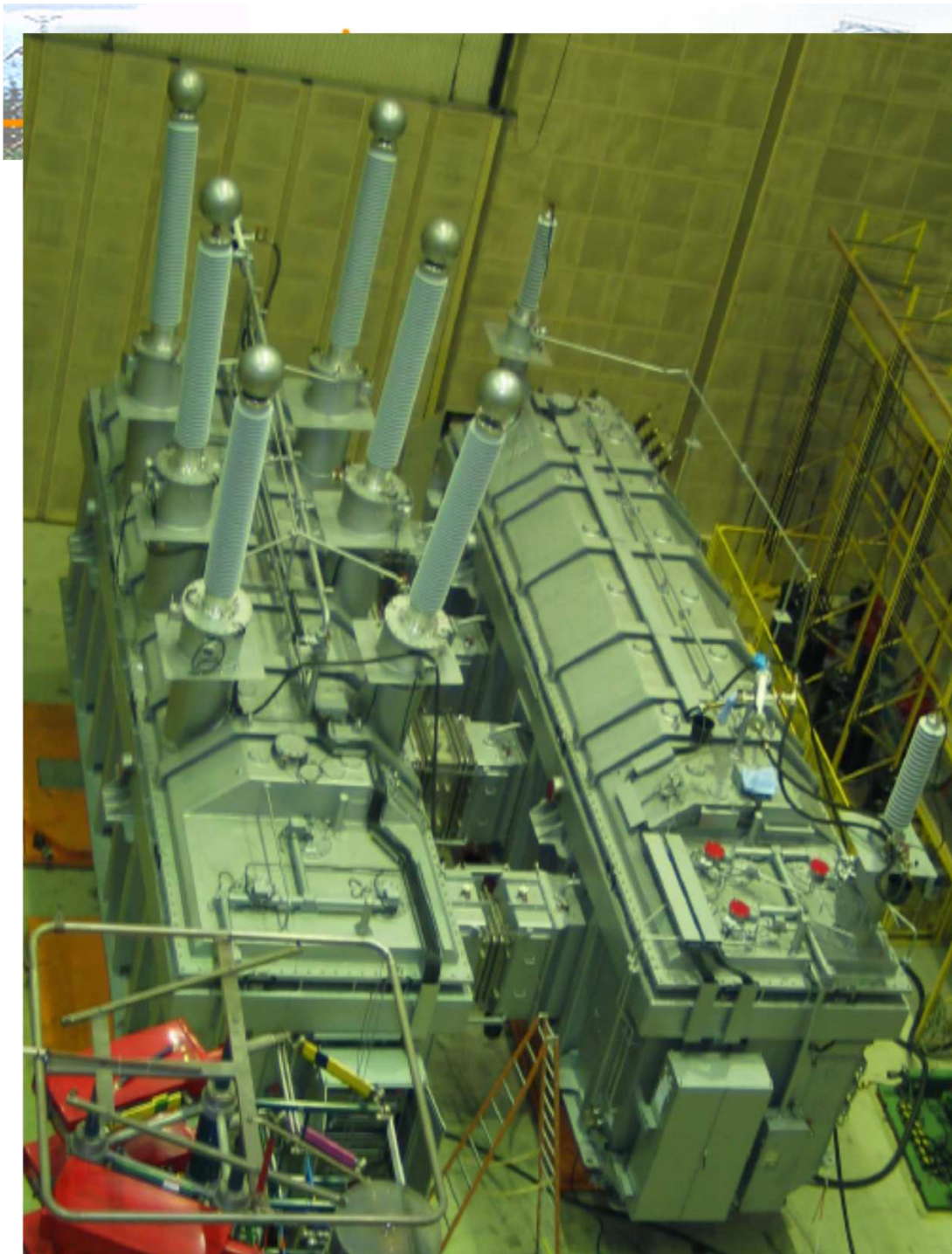
The resulting quadrature
voltage u_{inj}
Will be transformed and will be
injected between source and
load (Voltage ΔV)





A Tauern PST gerjesztő a
melegedési próbán

600 MVA
232 / 232 kV
+/- 35°
Exciter unit during
temperature rise test



Tauern PST **feszpróbája** hűtő nélkül

600 MVA
232 / 232 kV
+/- 35°
PST without cooling
equipment during
dielectric tests

meg, 2016. október 19-21.



diagnostics

Kapruni PST szállítása



Tauern PST Kaprunban



XVI. Szigetelésdiagnosztikai Konferencia, Sümeg, 2016. október 19-21.



diagnostics

Kapruni PST

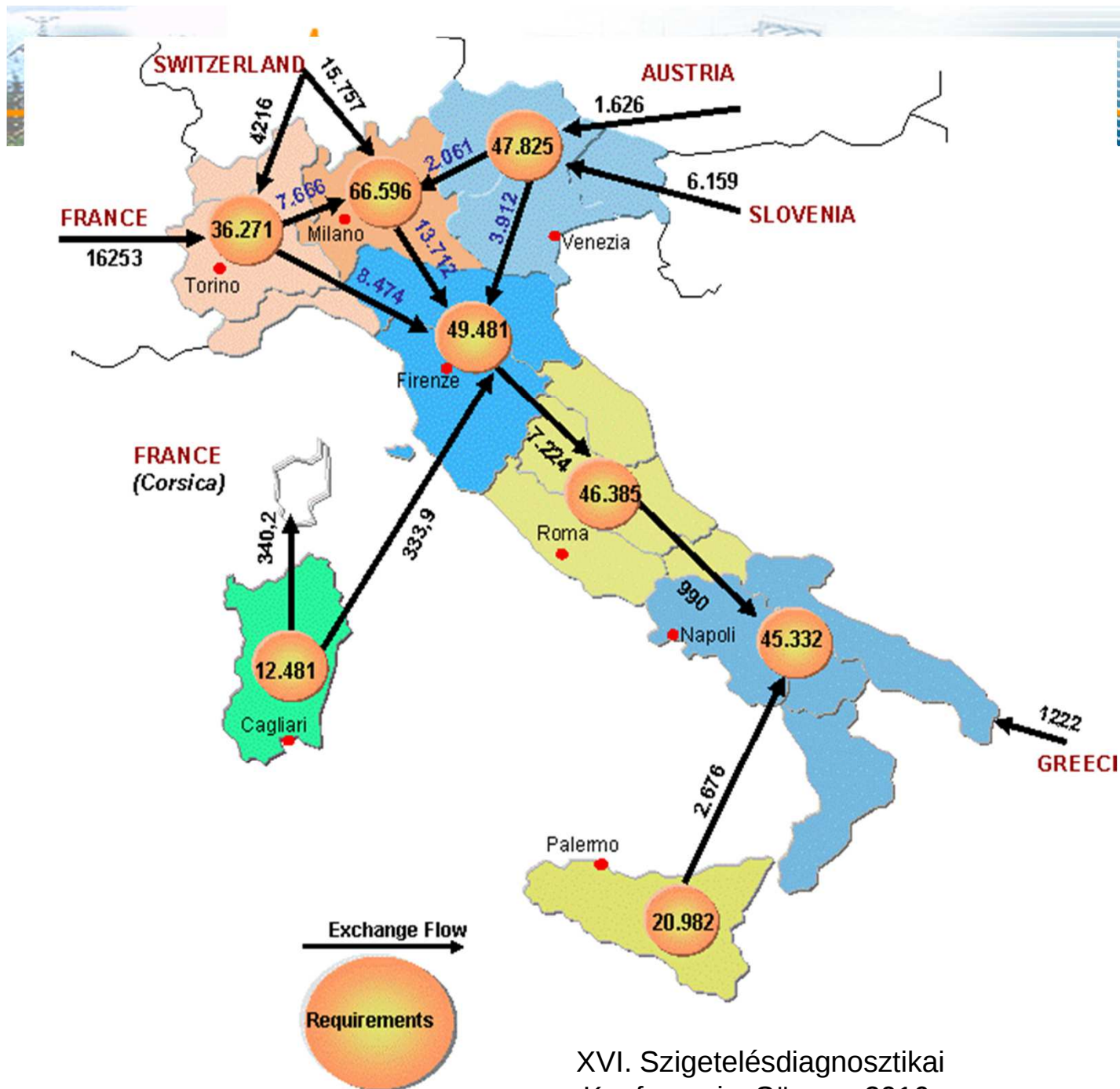




Tauren PST Kaprunban: zajvédő burkolat, ház



600 MVA
232 / 232 kV
+/- 35°
In its -17 dB sound
enclosure



Olaszországi probléma:
energiahiány,
energia szállítási
szerződés (Svájc,
Franciaország).

Átviteli folyosó:
francia, svájci,
osztrák-szlovén

Egyik olasz PST főbb adatai (380 kV Rondissone)

Nominal frequency:	50 Hz
Nominal PST voltages:	400 kV / 400 kV
Nominal line current:	2350 A
Nominal throughput power:	1630 MVA
Voltage shift type:	Asymmetrical (quad-booster)
Off-load regulation angle:	$\geq 18^\circ$ (Advance)
On-load regulation angle	$\geq 12^\circ$, with line current = 70% of I_n
Max commutation time over full regulating range:	180 s
Busbar short circuit current:	40 kA
Maximum sound pressure level at nominal voltage and frequency	≤ 78 dB(A)



Egyik olasz PST főbb adatai

Series transformer	
Rated voltage induced in series winding	74875 V
Rated current through series windings	2353 A
Two-winding rated power	528.5 MVA
Shunt transformer	
Rated voltage	400000 V
Rated current through series windings	725.8 A
Two-winding rated power	502.8 MVA
Complete PST	
Short circuit impedance rel. to 1630 MVA at 0° angle regulation	11%
Short circuit impedance rel. to 1630 MVA at 18° angle regulation	13.5%
Load losses	2596 kW
No-load losses	269 kW
Total weight	734000 kg
Dimensions L x W x H	18.2 x 12.6 x 10.25 m

Egyik olasz PST

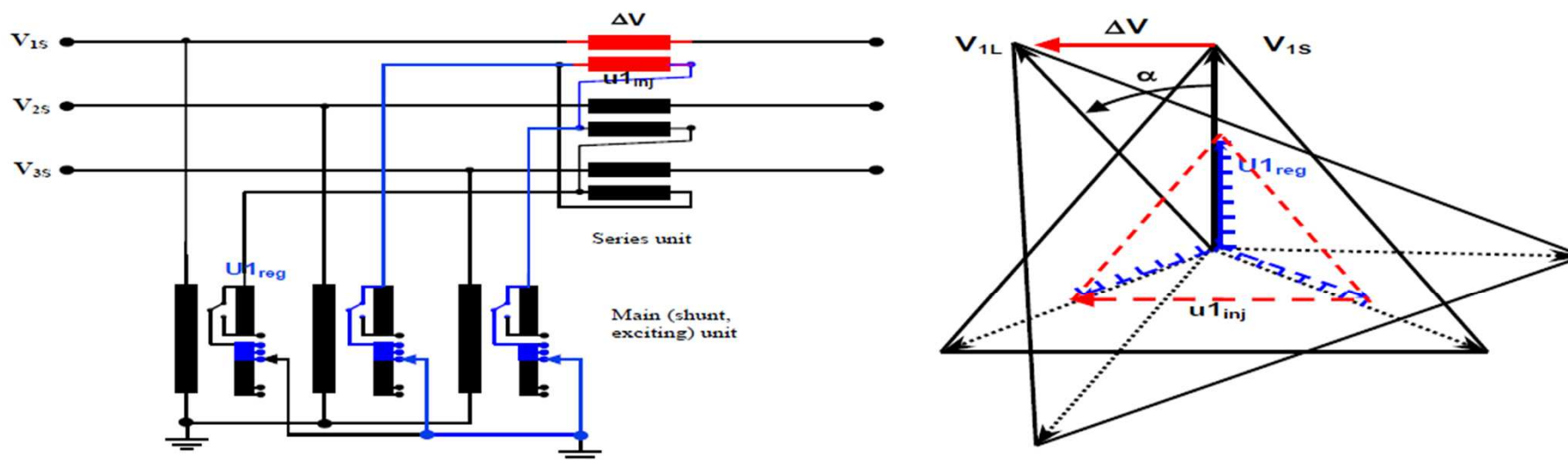


Fig. 1a: Exciter and booster transformers, winding connection. Voltage Phasor diagram.



Egyik olasz PST





Észak Belgiumban 3 x 1400 MVA +/-25 PST telepítése

- UCTE-hálózat 400 és 220kV-os összeköttetések.
- Birds-eye térkép mutatja a 400kV-os hurkot és a határkereszteződéseket.

Térkép rövidítések:

F: hálózati termelő

B+NL+D: hálózati fogyasztók

A térkép a normál állapotú teljesítményáramlást mutatja.



diagnostics

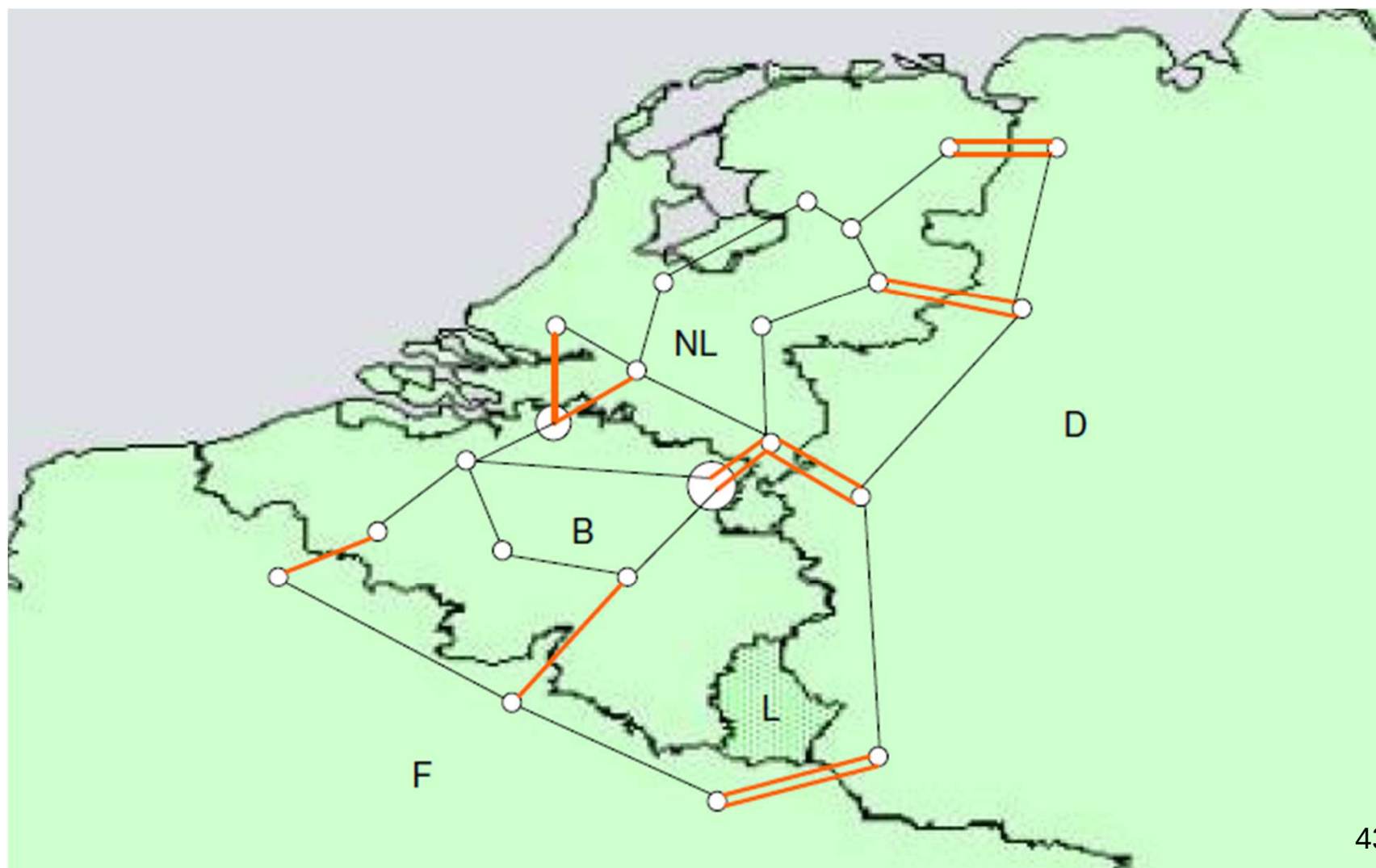
Belga PST



XVI. Szigetelésdiagnosztikai Konferencia, Sümeg, 2016. október 19-21.



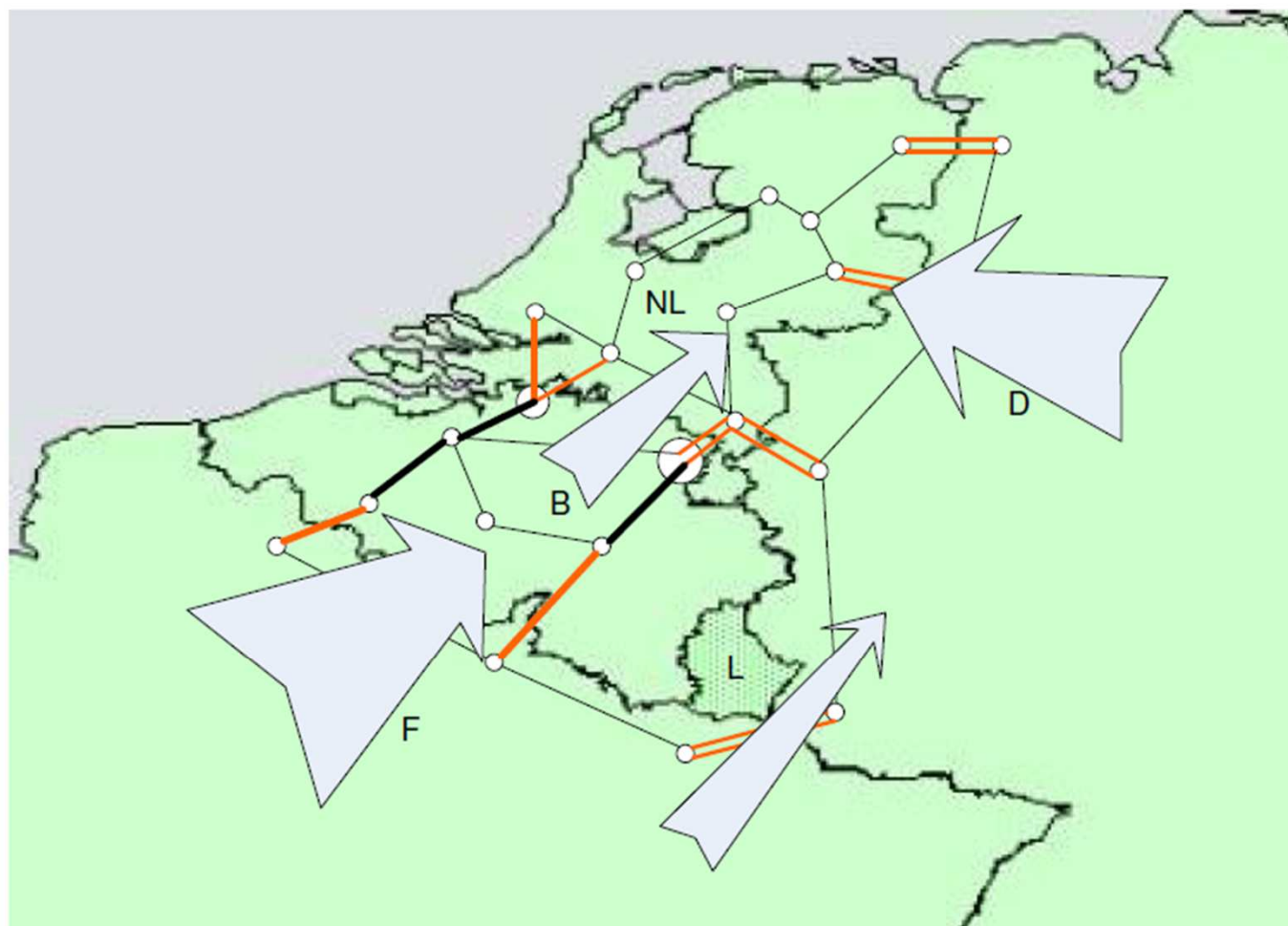
Belga PST





F: hálózati termelő; B+NL+D: hálózati fogyasztók

A térkép a „normál” állapotú teljesítménvámrlást mutatja.





1. észrevétel:

Nagyon nagy energiaáramlás Belgium felé

Túlterhelés déli határnál

Túlterhelés miatti nagy a kiesési kockázat

Kisebb kapacitás a fogyasztók felé

2. észrevétel:

Különböző villamos hosszak kiegyenlítetlen áramlást okoznak Belgium felé

Kelet (erősen terhelt), Nyugat (kevésbé terhelt)

Átmeneti (rövid) beavatkozás: intenzív adatcsere, nemzetközi szabályozás,
Azonban ezektől még a lappangó kockázat marad



Hosszabbtávú beavatkozás, akciók = hardver

Párhuzamos távvezetékek

Trafó technológia alkalmazása

Forgógépek

Félvezetők

Stratégiai opciók

Hozzáférhető felületek, közvélemény

Állandósult állapot szemben a gyors stabilitási viselkedéssel

Flexibilitás

Ismerős technológiák

Költség

Jövő nemzetközi hálózat fejlesztés



Végső megoldás: 7 PST

Nagyon kis terület áll rendelkezésre (quasi kizárva a félvezetőket)

Hálózati stabilitás nem fő követelmény

Ismert technológia és referencia lista

Beruházási idő

Lehetőleg meglévő alállomások közelében

Határkereszteződés

Észak: kisebb befolyás legyen a természetes áramlásra

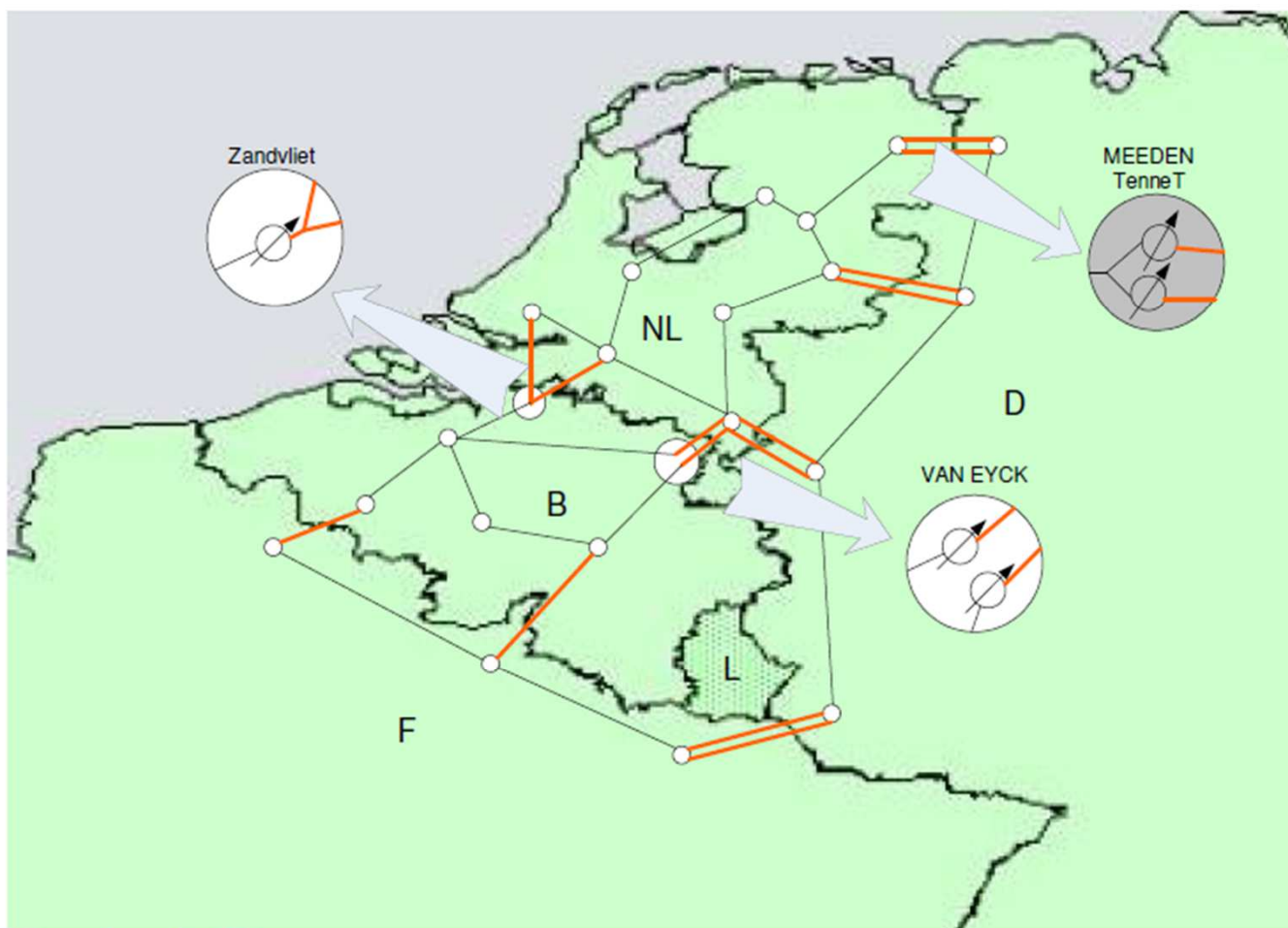


ABB VIP-seminar Cordoba (21-10-2005)

**Belga PST
eredménye**



Belga PST főbb adatai:

Távvezetési termikus limit: 1400MVA

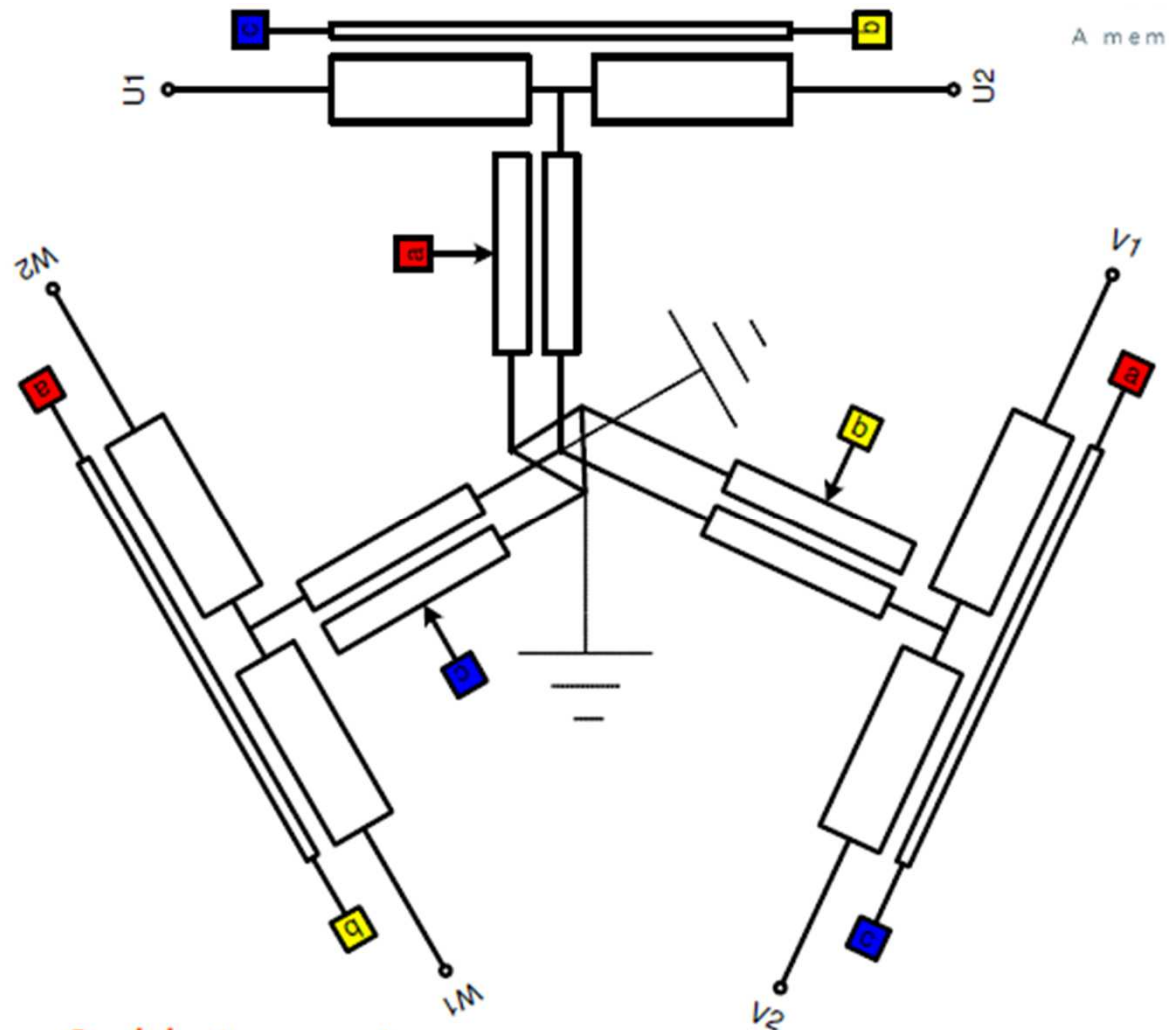
OLTC kapcsolási képesség (limit): +/-25 fok

Szimmetrikus: ne befolyásolja nagyon a hálózati fesztséget

Ezek a specifikációk teljesíthetőnek látszanak

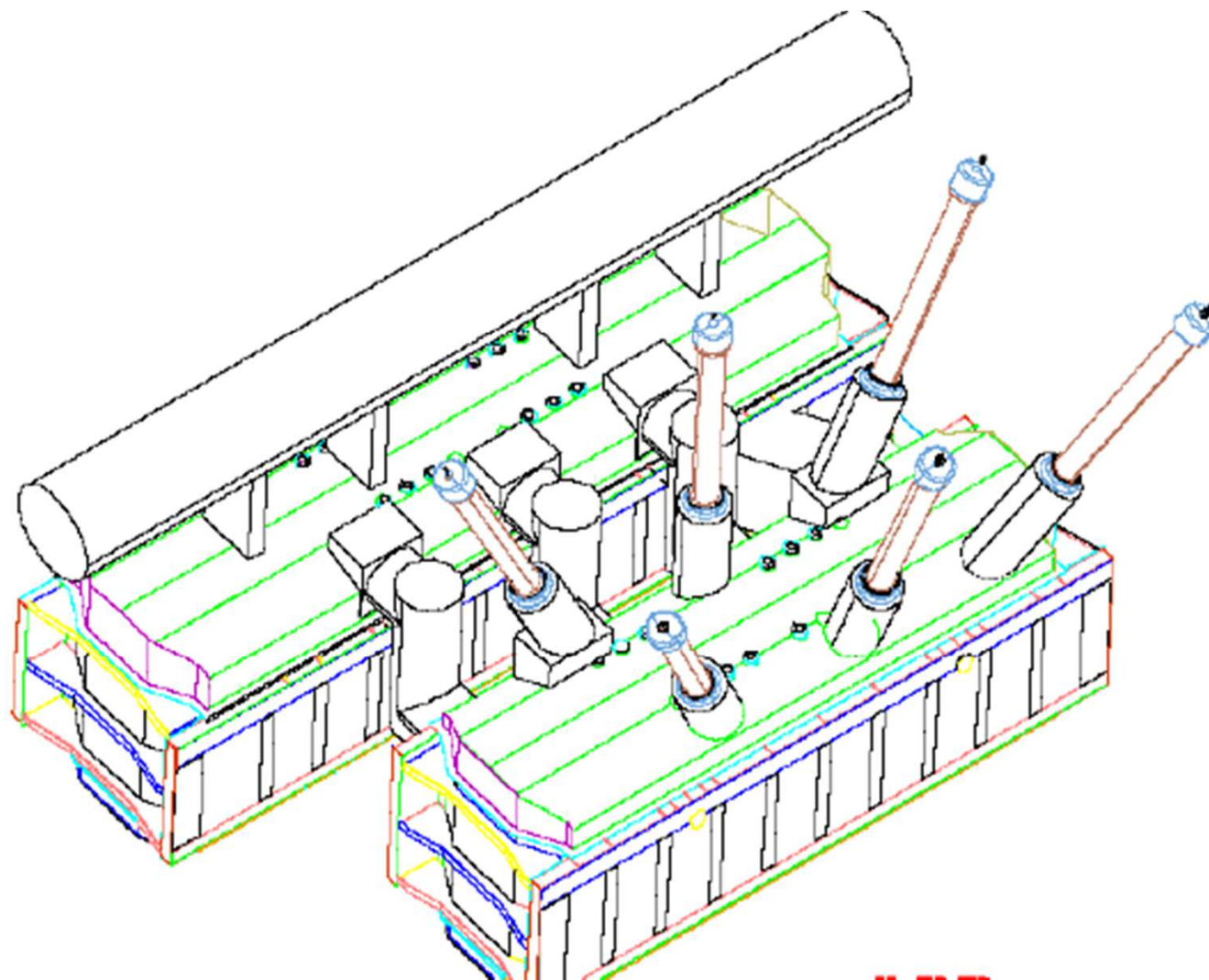


Belga PST





Belga PST





PST üzemeltetés

Hogyan változtatják a szöget?

Nagy befolyások az összes közeli hurokra

Terhelés és érzékenységi számítások

Koordináció a szomszédos PST-vel (Meeden – TenneT NL)

Szög kézikönyv mind lehetséges hálózati szituációra (beleértve a jövőben adódóakat is)

Konklúziók, avagy a PST jövője

- A PST egy kicsit olyan, mint a normál trafó, azonos technológiával gyártják, de **számos specialitása** van mind kivitelben, mind a próbáknál, ezért speciális szakértelmet kíván..
- Az **új félvezető technika** képes néhány PST funkciót megoldani, rugalmasak, gyorsak, sok esetben jobban kielégítik a rendszer igényeket.
- Speciális alkalmazások, mint UPFC (Unified Power Flow Controller) GTO (Gate Turn-Off Thyristor), amely nemcsak teljesítmény szabályoz, hanem meddőt is előállít/elnyel, valamint soros kompenzációt is végez.

Konklúziók, avagy a PST jövője (folyt.)

- Ha ezek rendelkezésre állnak, akkor **lenne értelme** a hatalmas és lassan reagáló **PST trafó használatának?**
- Az említett elektronikai előnyökre való tekintettel, jövőben az **elektronikai részarány nőni fog** a teljesítmény szabályozós piacon.
- Azonban **van még néhány hátrány**, így nincs **közvetlen áttörés**.
- A teljesítmény elektronika jelentős **felharmonikust, veszteséget termel**, valamint a nagyfeszültségű nagy teljesítményű elektronika ma **még elég költséges**.
- Lesz egy **egyensúly a klasszikus** megoldások és az új **flexibilis** elektronika között.
- De a **klasszikus PST is továbbfejlesztésre kerül**, így a közeljövőben még gazdaságosabb lesz.



Köszönöm a figyelmet