Védelmi és
Irányítástechnikai
Fórum
2019.

Középfeszültségű kiserőműves rendszerek védelmi funkciói

Dr. Petri Kornél

Tartalom

1. Az egyes energiaforrások üzemi sajátosságai
2. Hálózati konfigurációk, „microgrid”, szigetüzem
3. A „microgrid” védelmei
4. Védelmi funkciók megvalósítása
5. „Smartgrid” lehetőségek

1 Az egyes kiserőműves rendszerek üzemi sajátosságai

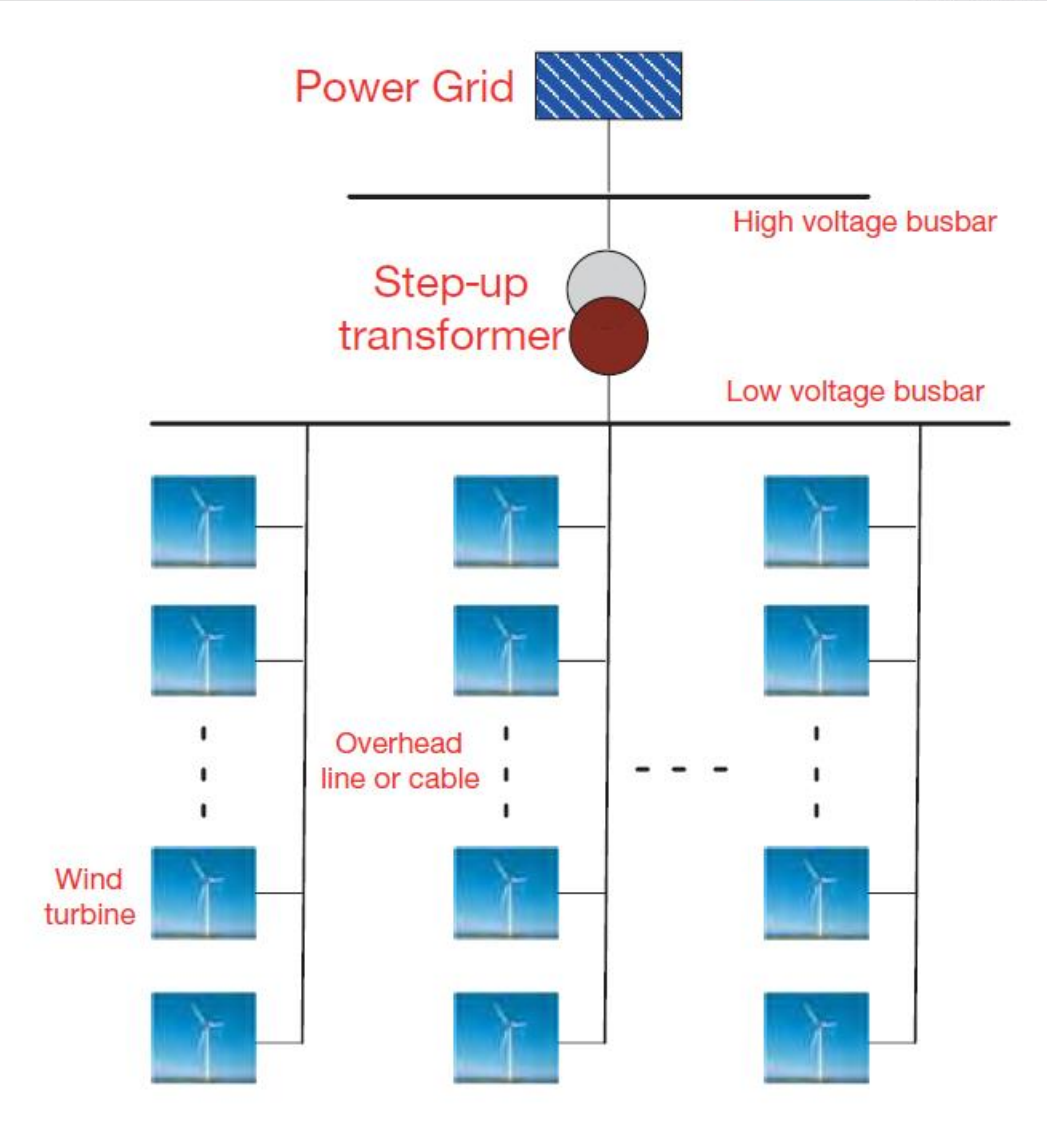
Kis generátorok csoportosítása az erősáramú technológia szerint

- **Szinkron generátor** (gőzturbina, gázturbina, Diesel, nagy vízturbina)
- **Aszinkron generátor** (kis vízturbina, fix fordulatszámú szélerőmű)
- **Inverter váltakozó áramú primerrel** (változó fordulatszámú szélerőmű, ár-apály erőmű)
- **Inverter egyenáramú primerrel** (napelemek, kis szélerőmű, üzemanyag cellák, tárolás)

Lényeges változások

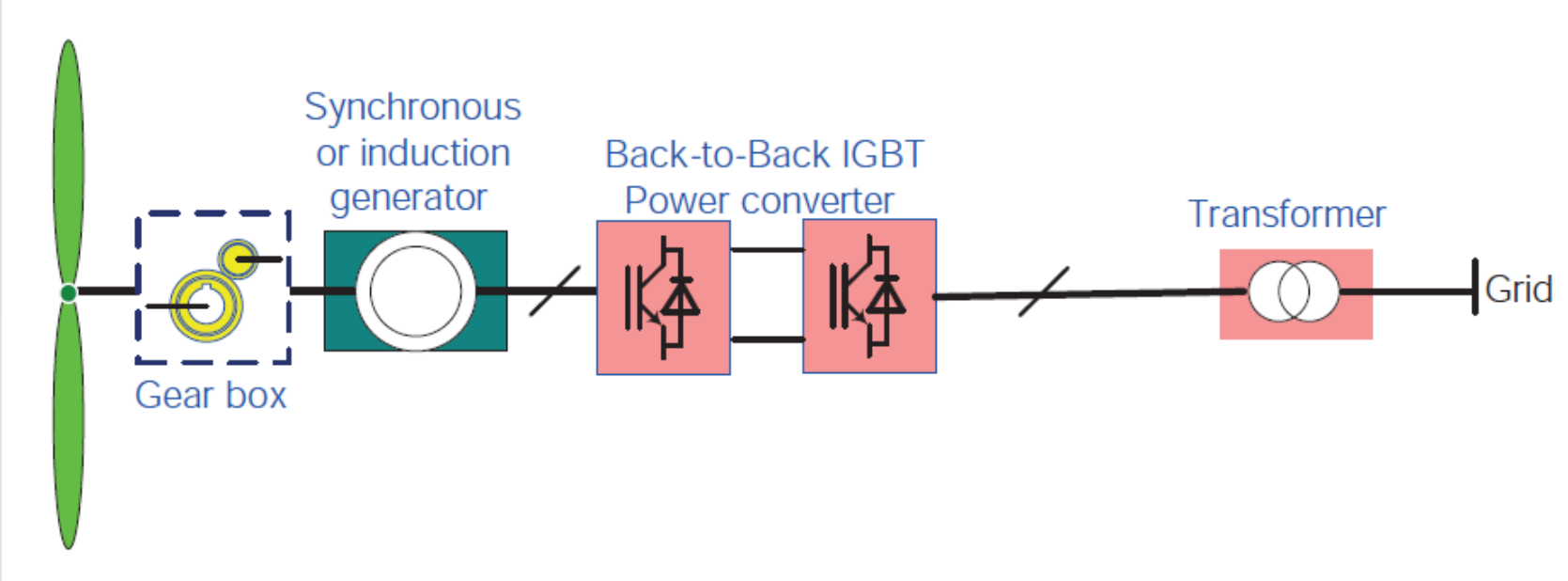
- **Nagy forgó tömegű szinkron generátorokhoz szokunk**
  (Szubtranziens - tranziens – állandósult viselkedés, nagy „inercia”, viszonylag lassú szabályozások, lengések, kiesés a szinkron járásból, belső hibák, szinkronozás, …)
- **Inverterek vezérlése**
  („azonnali” beavatkozás, korlátozott áram, nincs „inercia”, minden a vezérléstől függ, visszakapcsolás, szinkronozás,… ???)

Szélerőmű park



IEC

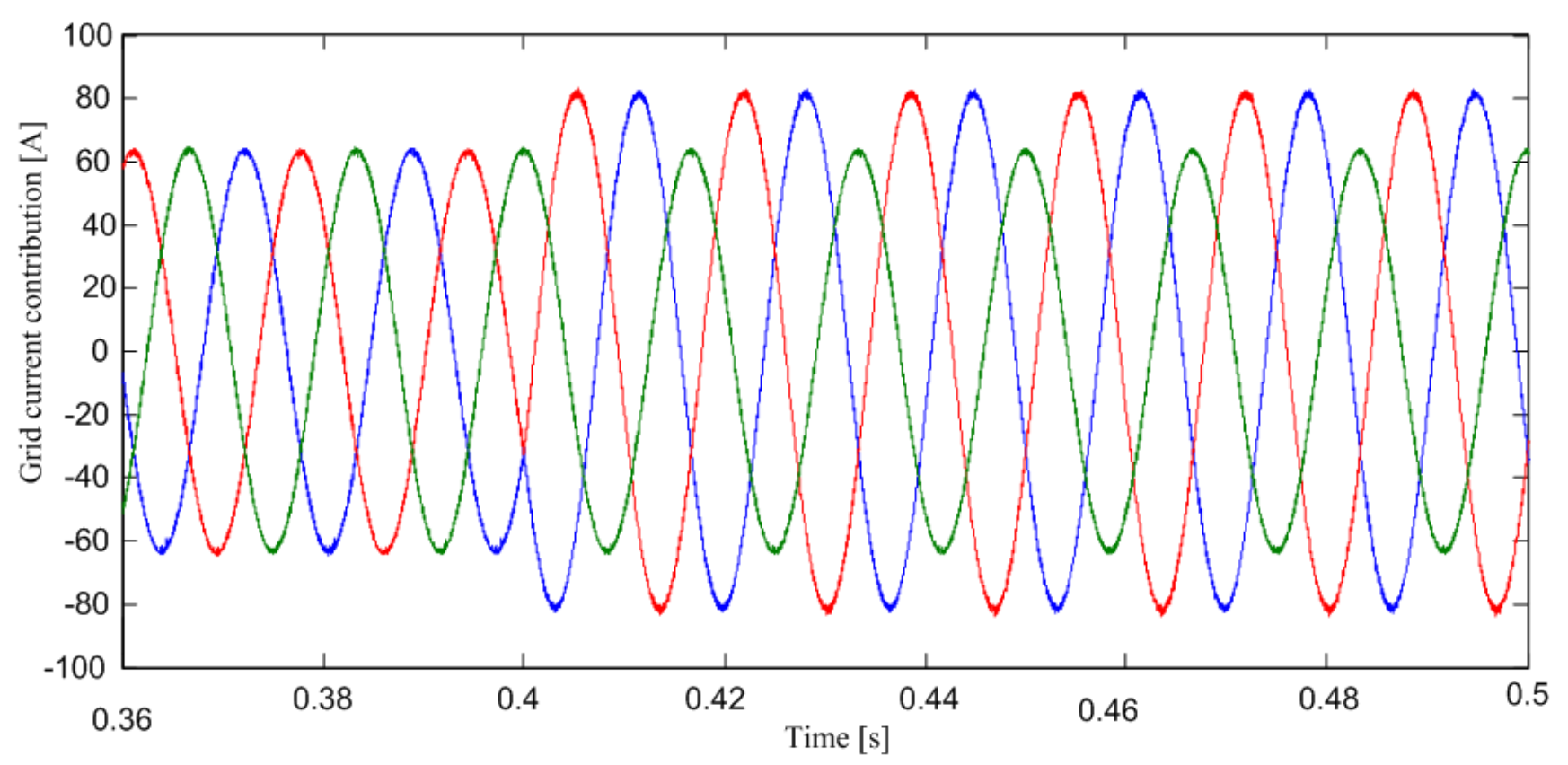
Egy szélgenerátor elvi sémája



A zárlati viselkedéshez ismerni kell ezek pontos működését!

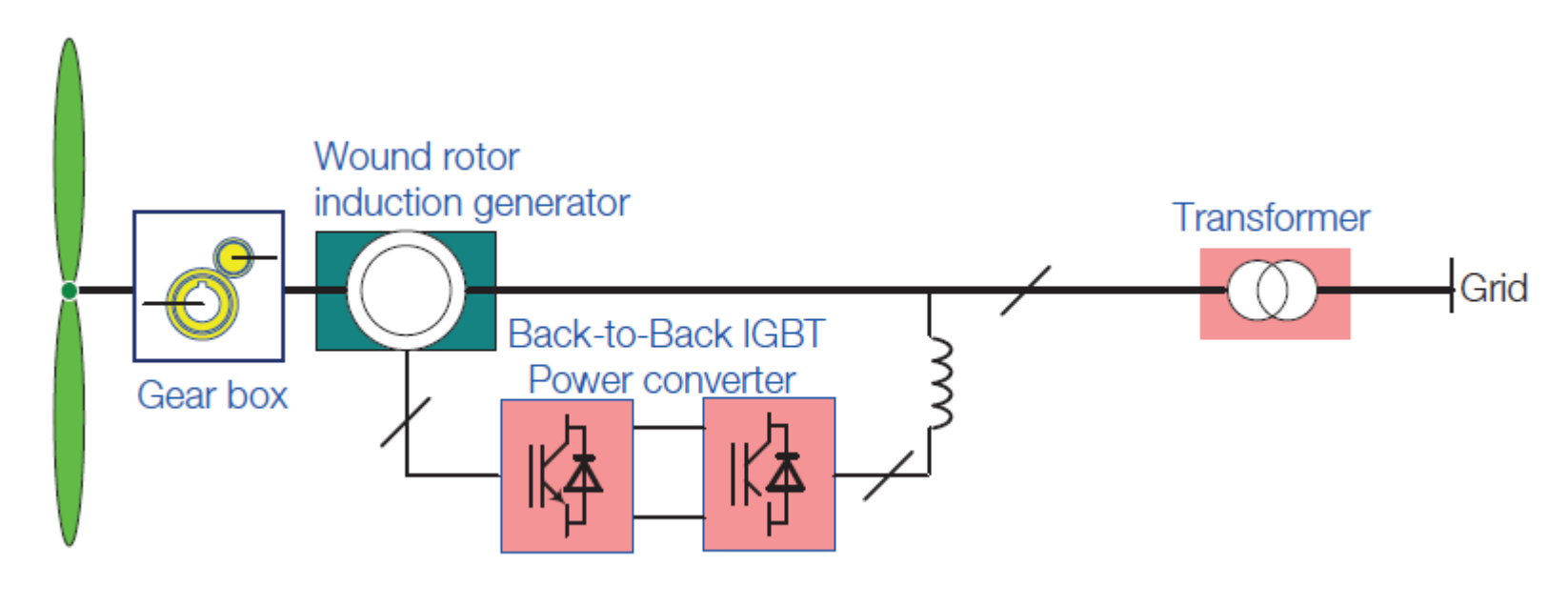
IEC

Egy szélgenerátor zárlati viselkedése



IEEE PES

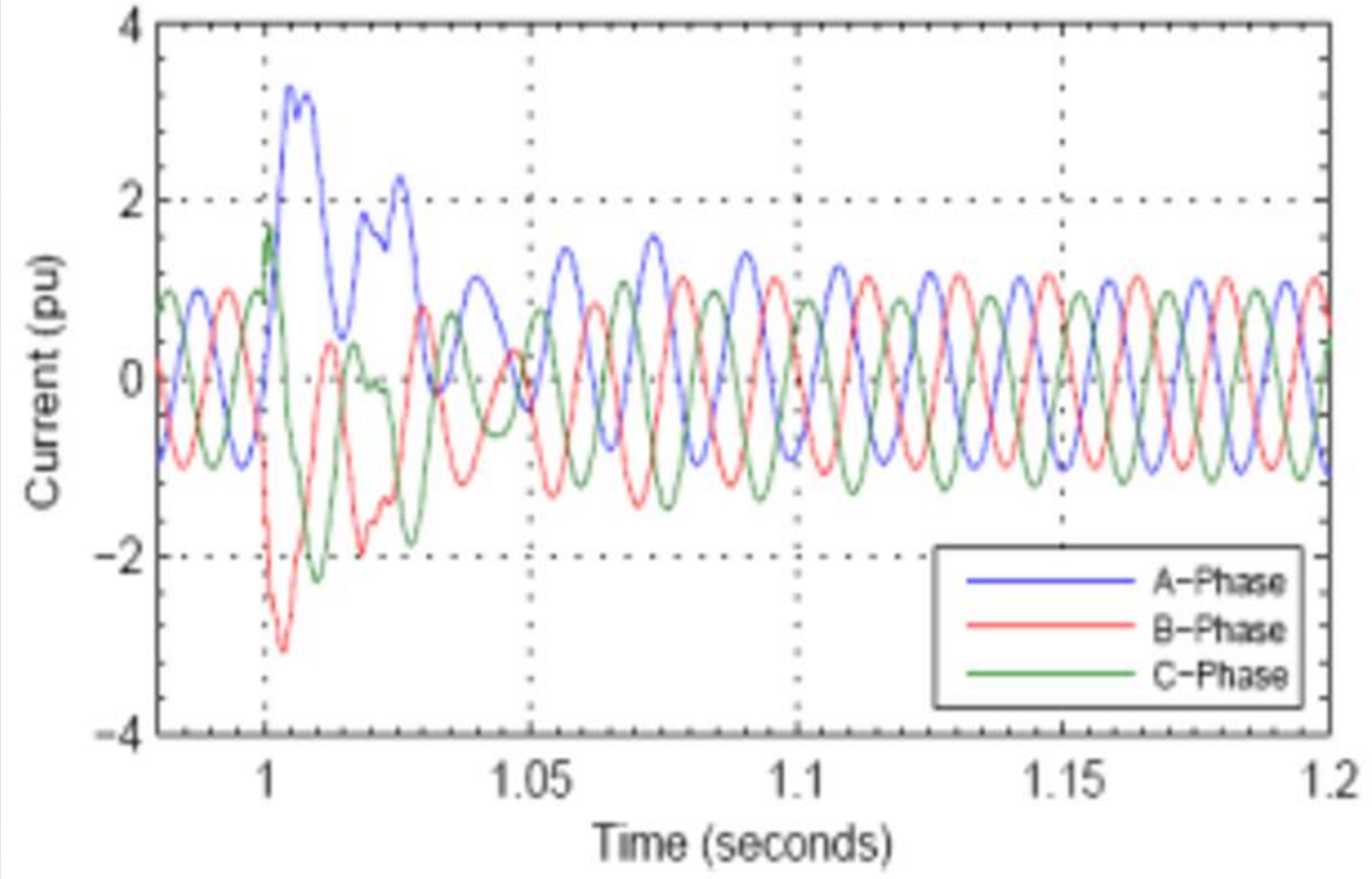
„Kétoldalról táplált generátor” elvi sémája



A zárlati viselkedéshez ismerni kell ezek pontos működését!

IEC

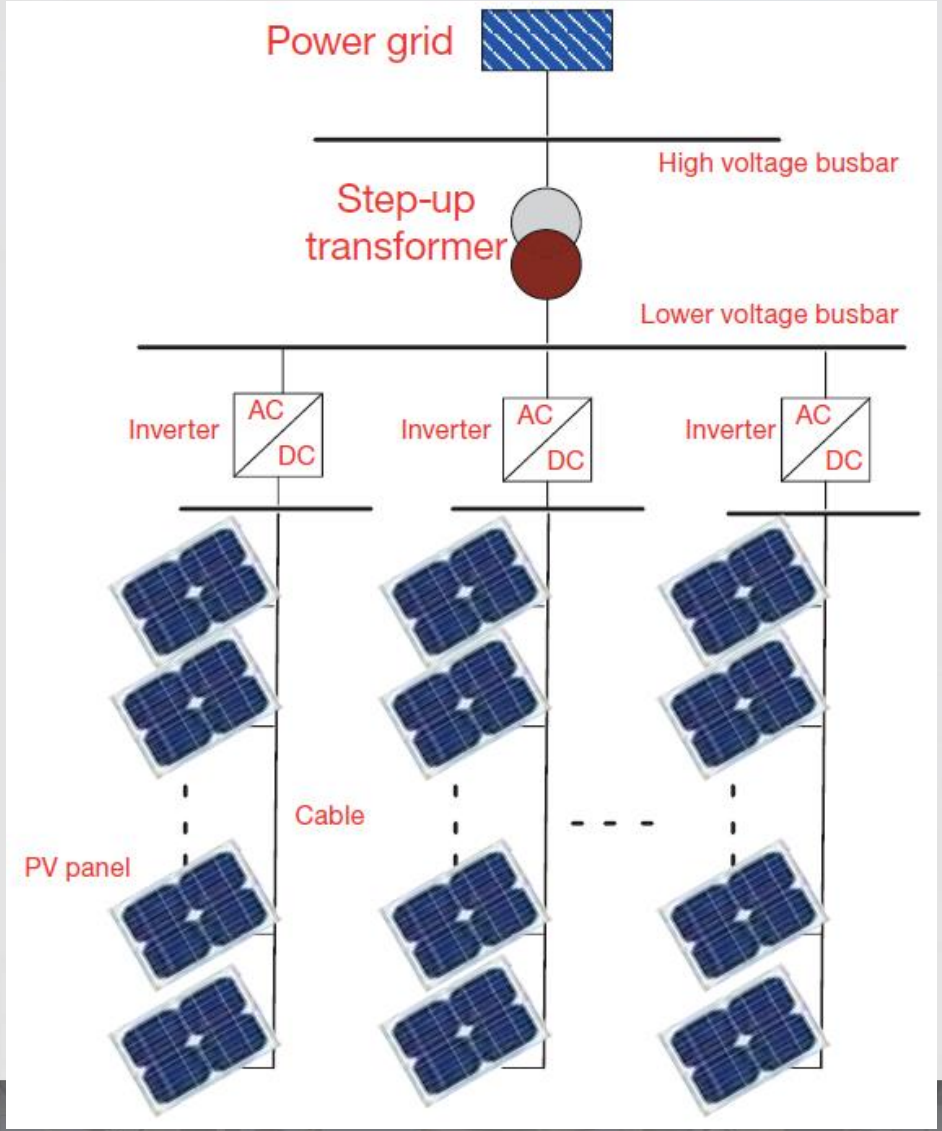
„Kétoldalról táplált generátor” zárlati viselkedése



IEEE PES

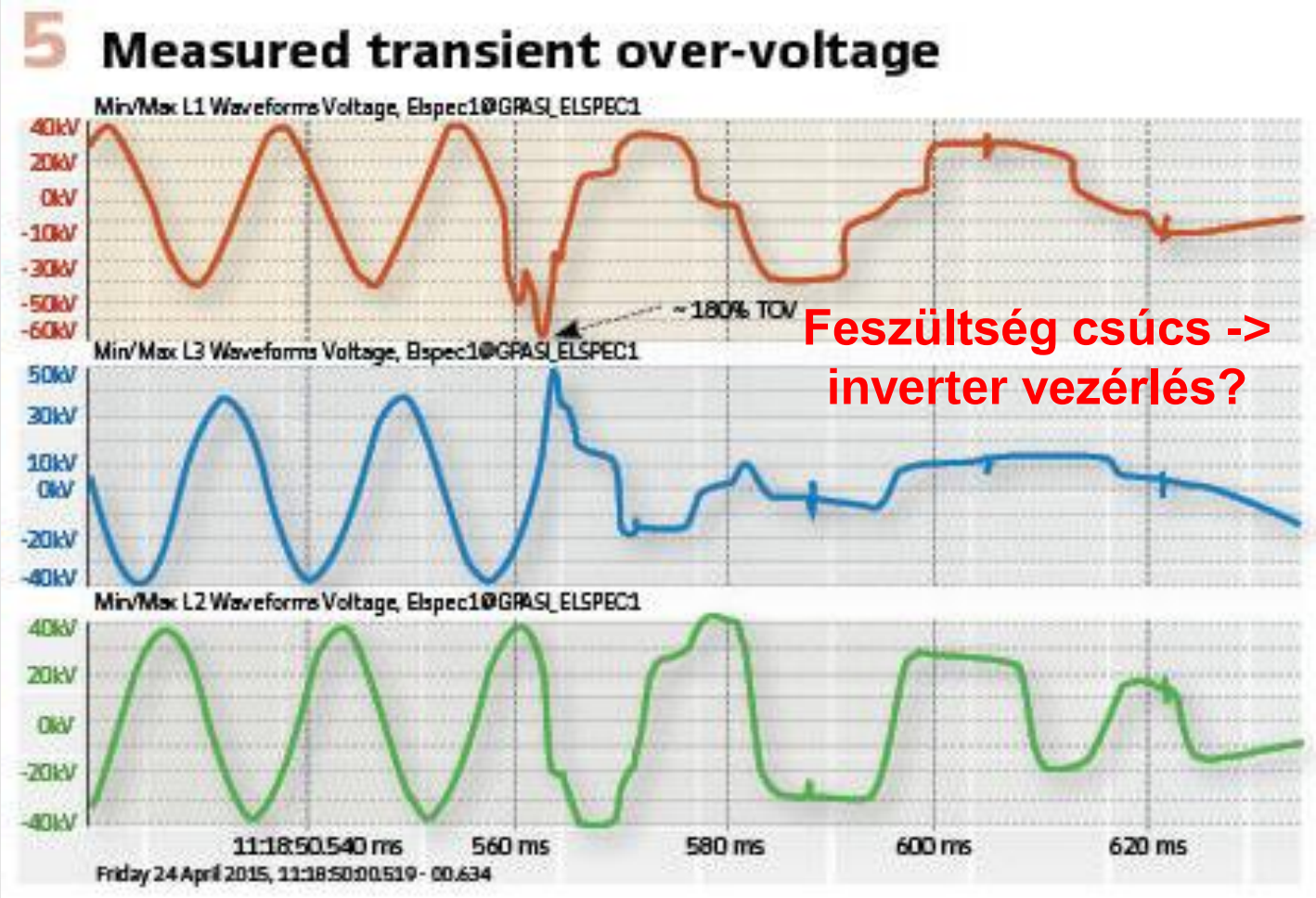
Szélgenerátorok szabályozási és védelmi igényei

Naperőmű park



IEC

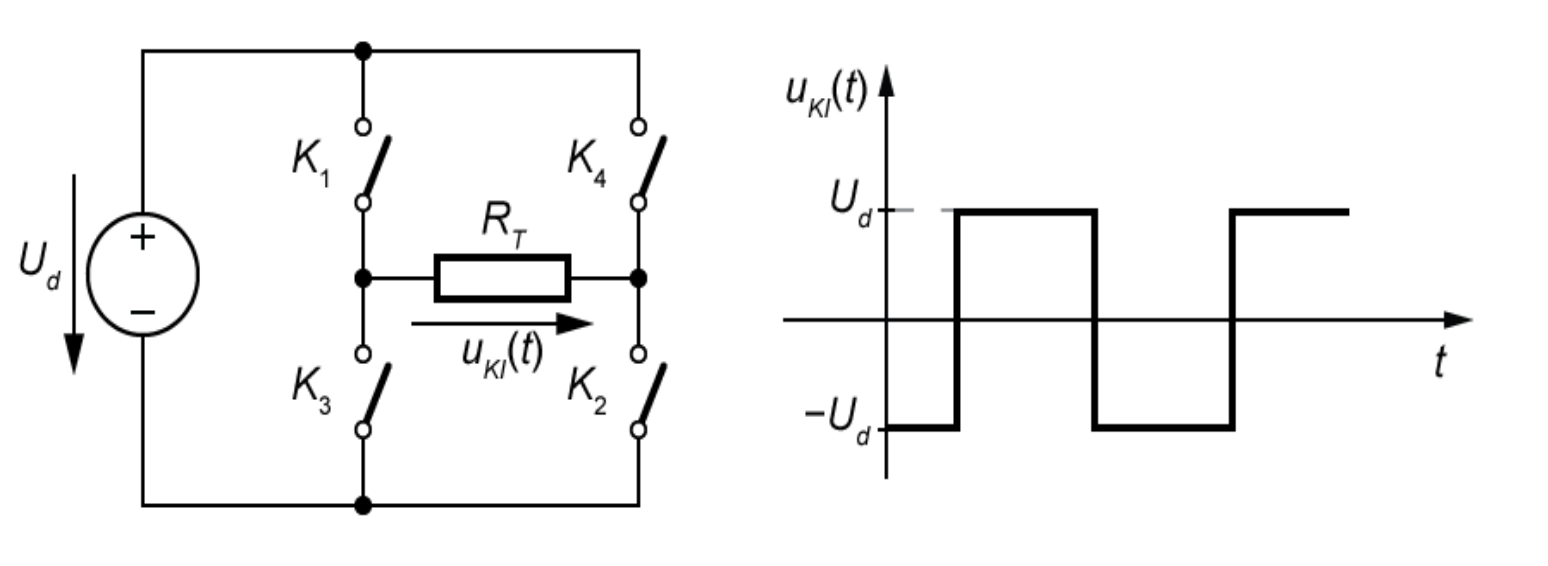
Naperőmű szigetüzeme



Feszültség csúcs -> inverter vezérlés?

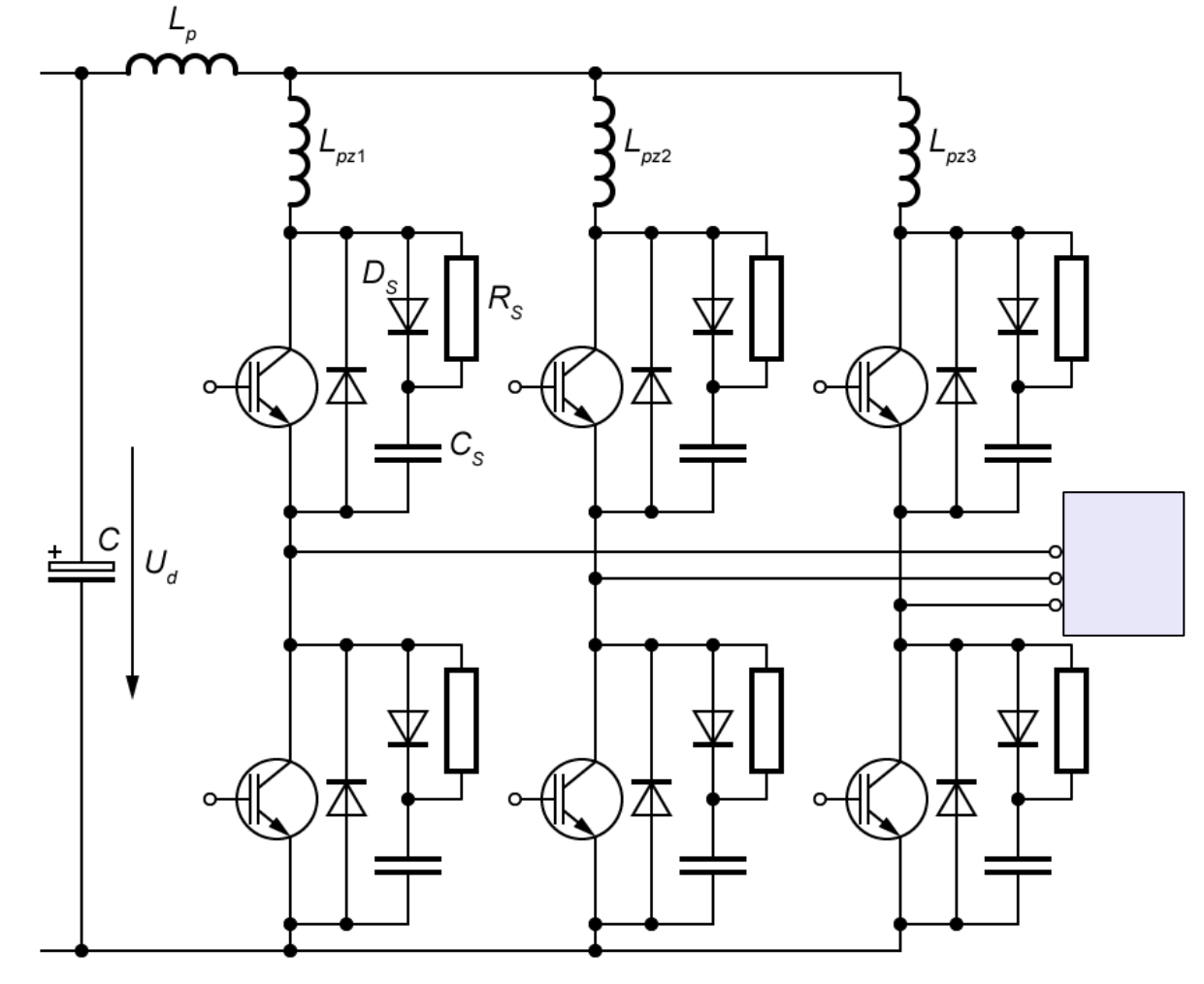
PACW

Az inverter elvi működése



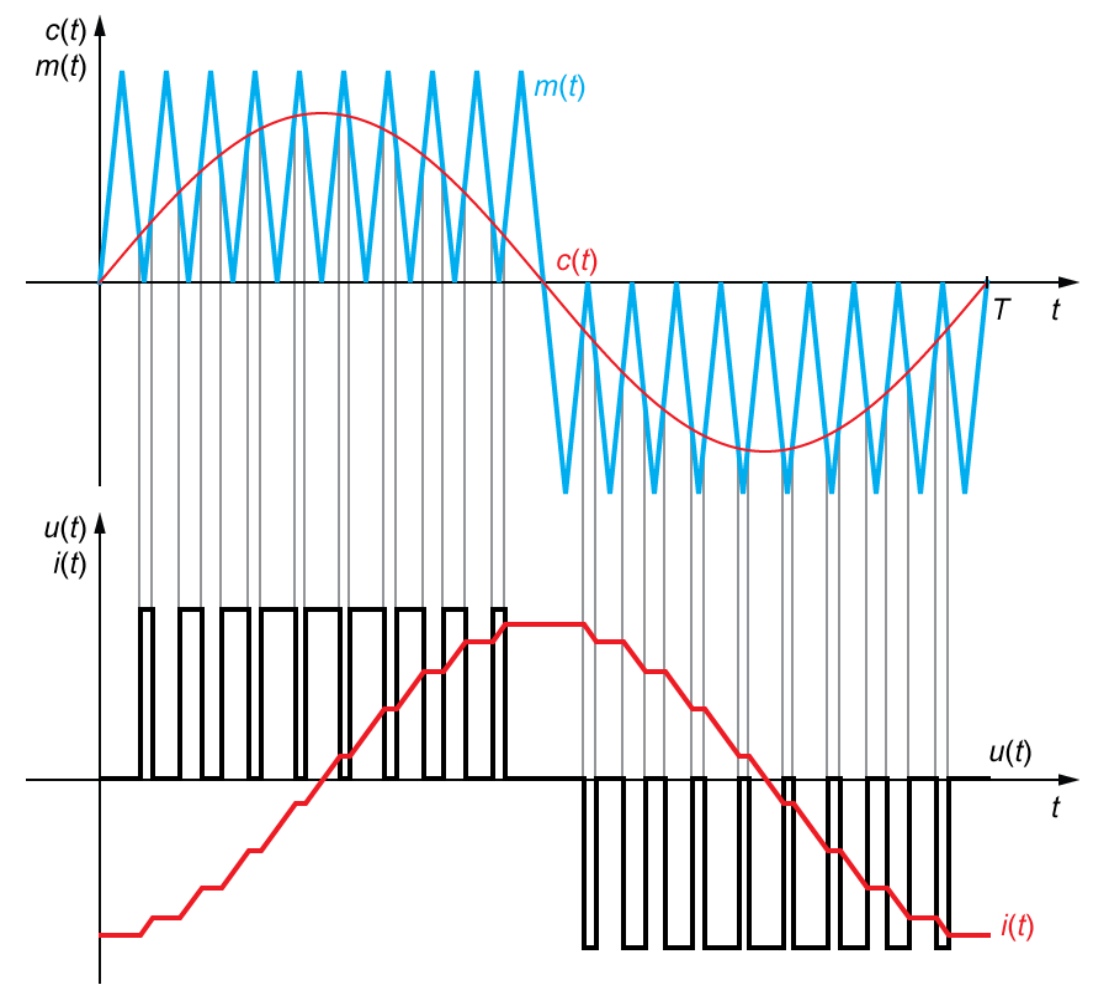
Tankönyv

Impulzus szélesség moduláció



Tankönyv

Impulzus szélesség moduláció



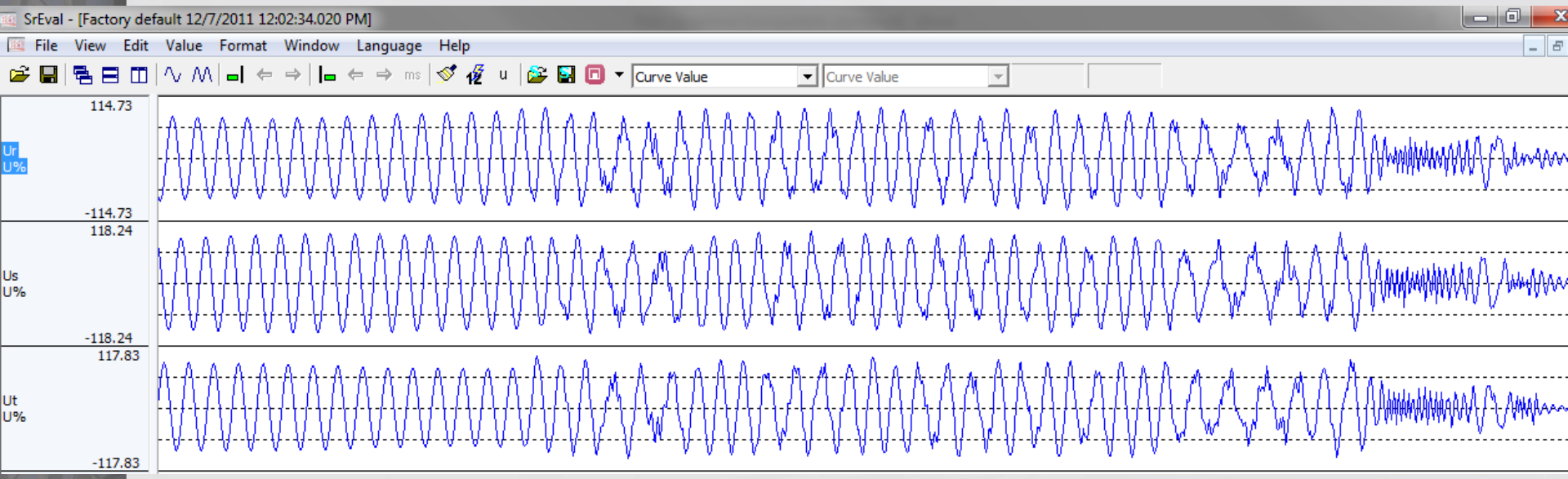
Tankönyv

Inverterek viselkedése „külső” zárlatkor, szigetüzemben

a) Maradjanak üzemben
   I. Táplálják a zárlatot
   II. Korlátozzák a zárlati rátáplálást
b) Maradjanak kapcsolatban, de álljanak le
c) Kapcsolódjanak le

Ez a szabályozás (mint minden más szabályozás) is „üzleti titok”-nak tűnik.

K…. 2011


SrEval - [Factory default 12/7/2011 12:02:34.020 PM]
File View Edit Value Format Window Language Help
Curve Value
Curve Value
114.73
Ur
U%
-114.73
118.24
Us
U%
-118.24
117.83
Ut
U%
-117.83

?

- Az alkalmazott inverter típusa?
- Az inverter vezérlés célfüggvénye(i)?
- A vezérlő dinamikus viselkedése (állapotváltások, lengés hajlam)?
- Tranziens kitáplálás zárlatkor (minden zárlatfajtánál)?
- Viselkedés aszimmetrikus feszültségnél?
- Leállás – indulás vezérlése?
- Az inverter saját védelmei (koordinálás)?
- Inverter vezérlők kölcsönhatása (eltérő paraméterek hatása)?
- Modellezés szimulációhoz?

„Mesterséges inercia”

„Mesterséges inercia”

Egyenes vonalú mozgás	Forgómozgás
$m * \frac{d^2s}{dt^2} + \cancel{k\frac{ds}{dt}} + F_v = F_m$	$\Theta * \frac{d^2\delta}{dt^2} + \cancel{K\frac{d\delta}{dt}} + M_v = M_m$
(tehetetlen) tömeg	tehetetlenségi nyomaték (moment of **inertia**)
$P = v * F$	$P = \omega M$
	$\omega\Theta * \frac{d^2\delta}{dt^2} + \omega M_v = \omega M_m$
	$T * \frac{d\omega}{dt} + P_v = P_m$
	perdület (impulzus nyomaték, impulzus momentum)

„Mesterséges inercia”

$$T * \frac{d\omega}{dt} + P_v = P_m$$

Jó lenne megnövelni a rendszer tehetetlenségét, hogy adott teljesítmény különbség minél kisebb frekvencia változási sebességet okozzon.

E helyett teljesítményt kell kinyerni például a lapátok forgó tömegéből az egyenirányító megfelelő vezérlésével. Ezzel a lapátok fokozott lassulását okozzuk. Ennek nagysága és időtartama korlátozott.

A hiányzó teljesítmény energiatárolókból szabályozottan pótolható.

Ez a szabályozás (mint minden más szabályozás) is „üzleti titok”-nak tűnik.

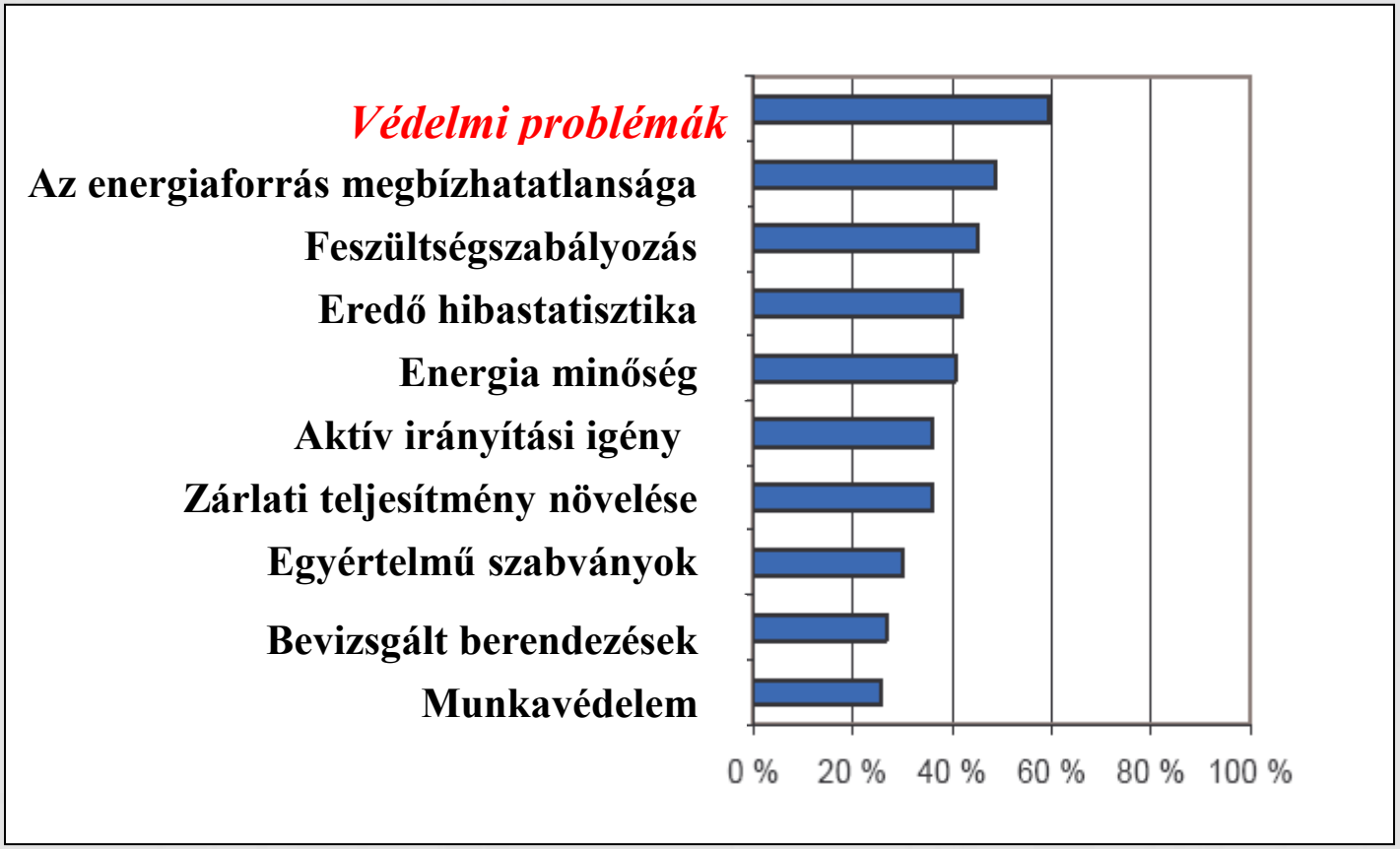
Egy folyamat eseménysorrendje

1) Zárlat (generátor kikapcsolás), frekvencia változás
2) A vezérlő érzékeli a frekvencia esést
3) A vezérlő növeli a teljesítmény alapjelet
4) A leadott teljesítmény nő
5) Javul a frekvencia változás (lassul az esés)
6) A turbina forgása lassul
7) Egyéb forrás (vagy terhelésledobás) helyreállítja a frekvenciát
8) A vezérlő visszaállítja az alapjelet
9) A leadott teljesítmény csökken, a turbina gyorsul, majd visszaáll az optimumra
10) Tranziensek vége, normál üzem

Kisgenerátorok előnyei a rendszer szempontjából

- Hálózati terhelés- és veszteség-csökkentés
- Q-U szabályozás
- Kedvezőbb feszültségeloszlás
- Kisebb központi tartalékolás ?!
- Lehetőség a csúcsigények követésére
- „Zöld”

A felmerülő problémák súlya



CODGUNet Final report 2003

Kis generátorok hátrányai védelmes szempontból

- Nagyobb zárlati teljesítmény
- Zárlati rátáplálás
- Sugaras hálózaton fordított energiaáramlás
- Idegen hatás a feszültségeloszlásra
- **Szigetüzem és visszakapcsolási problémák**
- Földelés (szigetüzemben)
- Feszültség minőség
- Terhelés kiegyenlítés szükséges
- Aktív irányítási igény

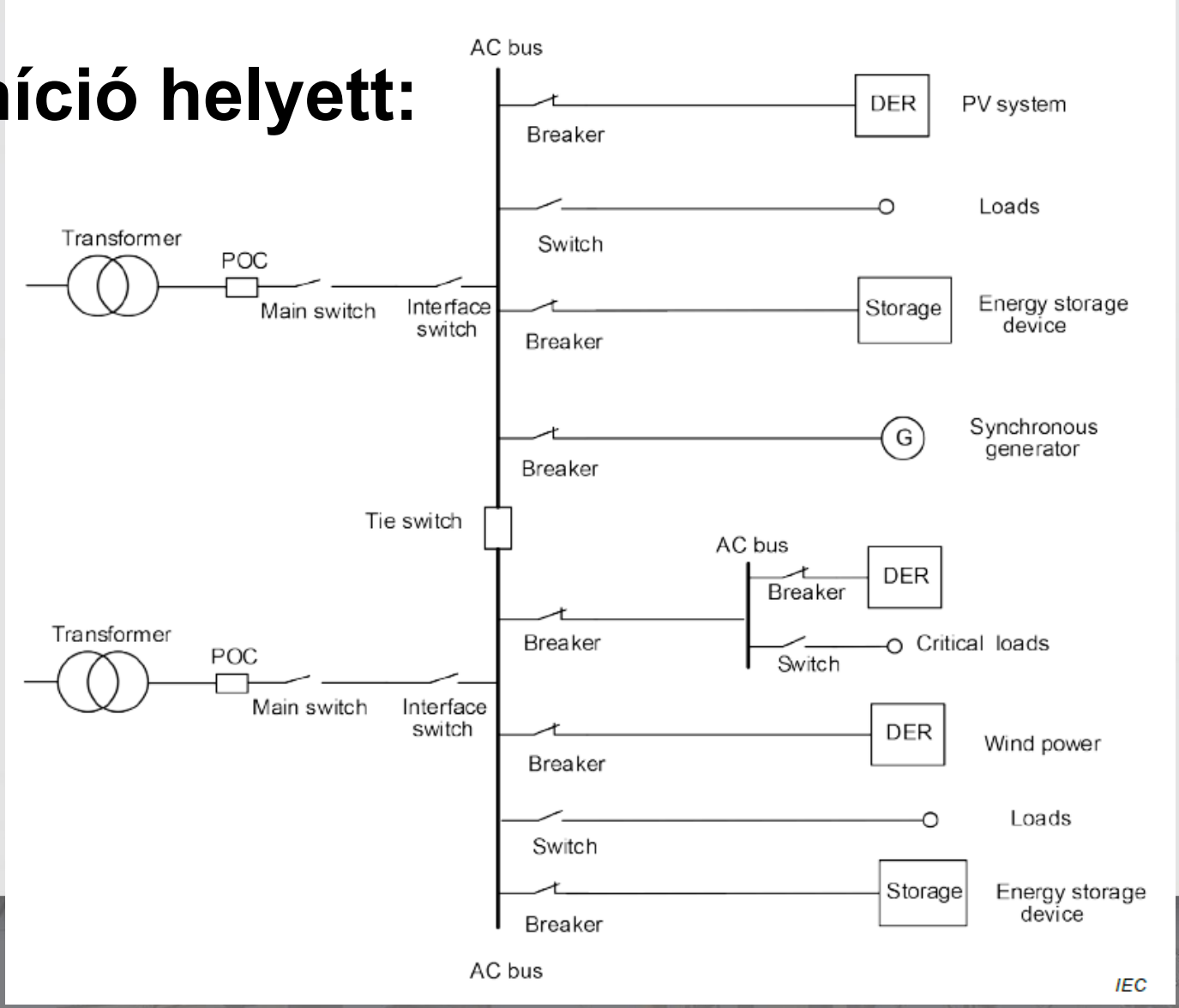
?

- A „mesterséges inercia” vezérlése?
- Reakcióidők (mérési igény, módszer)?
- Zárlati viselkedés?
- Közelíthető-e a szinkron gép viselkedése?
- Enyhíthetők-e a hátrányok?

2 Hálózati konfigurációk, „microgrid”, szigetüzem

„Microgrid” (példa)

Definíció helyett:



A „microgrid” sajátosságai

- Önálló szabályozási igények
- Kétirányú energiaáramlás
- Kis zárlati áramok
- Kis „inercia”
- Dinamikus változások
  - Megújuló energiaforrások
  - Források és terhelések „random” változásai
- Lényegesen eltérő üzemmódok
  - Hálózati üzem
  - Szigetüzem

A „microgrid” szabályozási igények

- **Tranziens** (0-50 ms időtartam)
  - **Zárlatok**
  - **Kapcsolások**
- Dinamikus (50 ms – 2 s időtartam)
  - Megújuló források változása
  - Terhelés változások
- Stacioner
  - Menetrendek

?

- Életképes-e egy microgrid?
  - P-f egyensúly
  - Q-U egyensúly
  - Eltérő üzemmód – eltérő védelmi igények
  - Tranziensek az üzemmódok váltásakor
  - Kapcsolási tranziensek – zárlati tranziensek

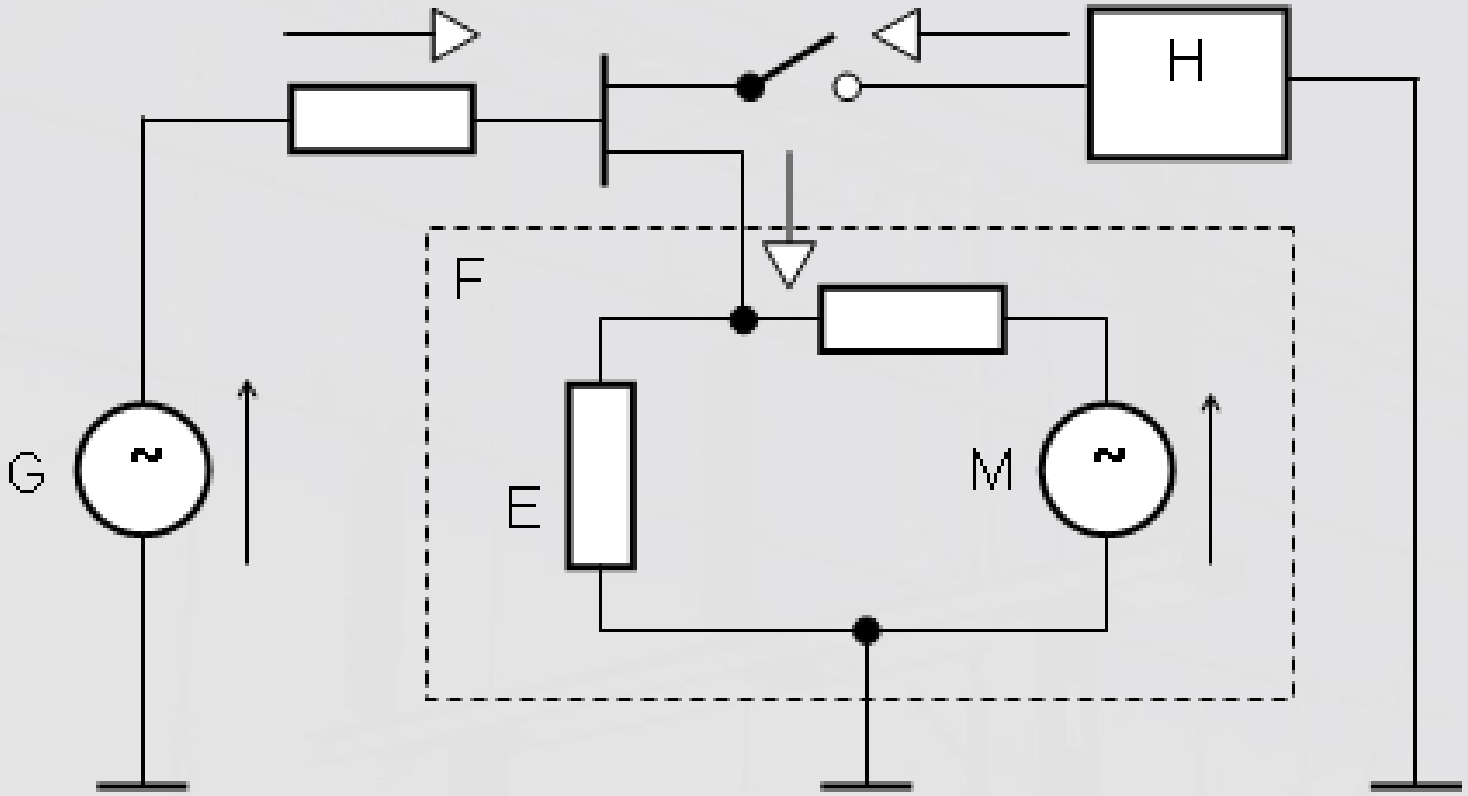
A szigetüzem kialakulásának okai

- Zárlathárítás
- Sötét átkapcsolás
- Szándékos kikapcsolás
- Megszakító felesleges kikapcsolódása
- Emberi tévedés

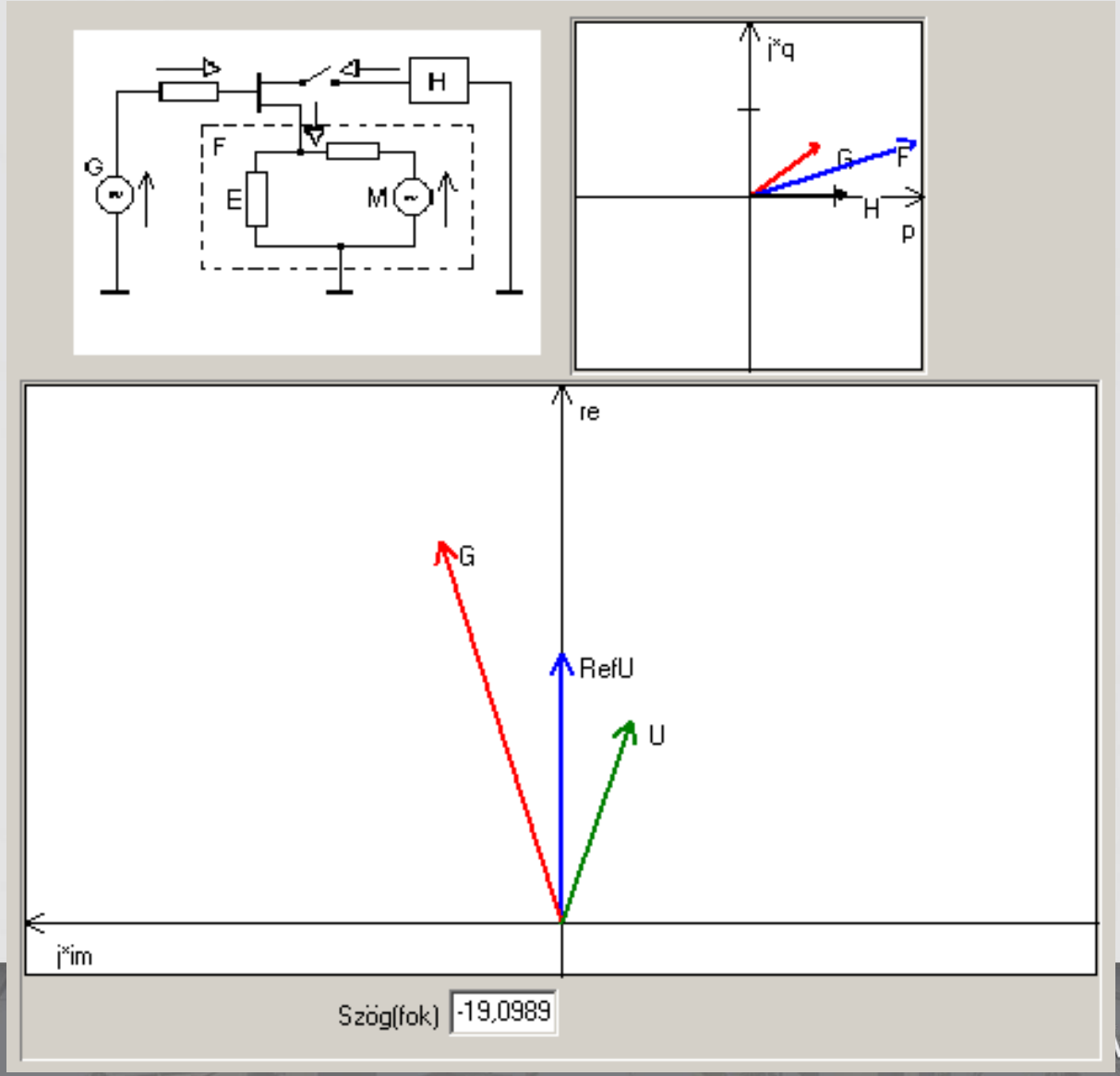
A szigetüzem hátrányai

- Feszültség alatt maradt hálózatrész
- Kis „inercia”
- Nincs rendszerfelügyelet (U,f)
- Fogyasztó meghibásodást okozhat
- Kis zárlati teljesítmény
- Csillagpont?
- Automatikus visszakapcsolás lehet aszinkron állapotban
- Nehezíti a rendszer-helyreállítást

A szigetüzem



A vektorugrás



A vektorugrás lehetséges okai

- Szigetüzem
- Fogyasztók ki- bekapcsolása
- Motor indítás
- Zárlat
- Hálózati állapot változás
- Párhuzamos kis generátor kikapcsolódása
- Stb.

Lehetőségek a szigetüzem kimutatására/1

- Passzív módszerek
  - U>, U<
  - f>, f<
  - Frekvencia gradiens
  - Vektor-ugrás (lásd előbb)
  - Felharmonikus változások figyelése
  - Impedancia mérés

Lehetőségek a szigetüzem kimutatására/2

- Aktív módszerek (mesterséges változás hatásának figyelése)
  - Felharmonikus injektálás és impedancia mérés
  - Inverteres csatlakozásnál
    - Mesterséges ugrás (szög, frekvencia) az inverter vezérlésében, amit a hálózati csatlakozás hatására korrigál
  - Kikapcsoláskor sönt C vagy L bekapcsolása elrontja az esetleges teljesítmény egyensúlyt

Lehetőségek a szigetüzem kimutatására/3

- Távparancs a generátor kikapcsolására
  - Hangfrekvenciás körvezérlő parancs
  - Kiépített közvetlen parancsátvitel
  - A telemechanikai rendszer parancsa
- „Smart grid”

?

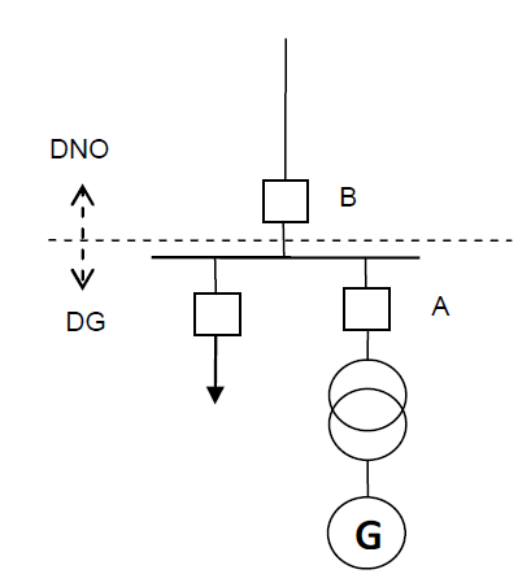
- A szigetüzem kimutatása
- Sziget kialakulása – egyéb tranziensek
- Kisgenerátorok azonnali kikapcsolása vagy „microgrid” üzem (tranziensekkel)
- A „microgrid” kisgenerátorainak szerepe a rendszer stabilitásban
- A hálózat kisgenerátor felvevő képessége

3 Védelmi funkciók

Védelmi feladatok

- A kis generátor külső és belső hibák ellen védve legyen (üzemeltetői érdek)
- A kis generátor ne zavarja a hálózatot és a fogyasztókat (ÁSZ érdek)

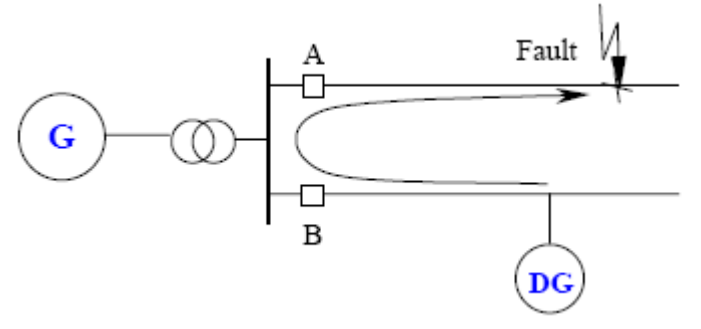
Védelmi követelmények



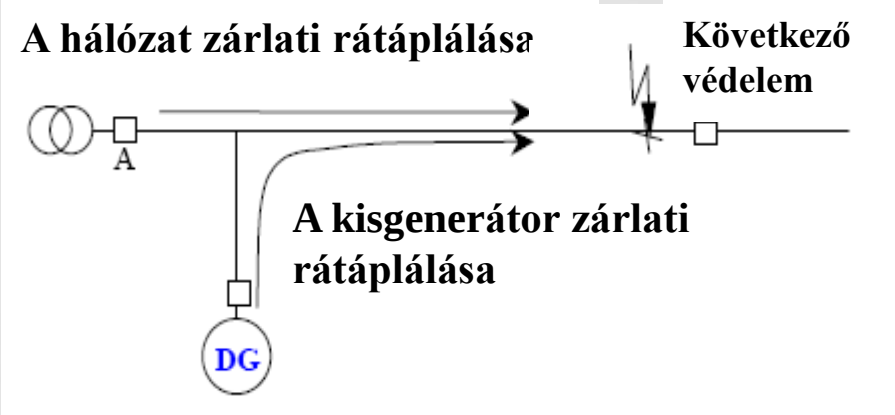
- Megbízhatóság
- Érzékenység
- Gyorsaság
- Szelektivitás
- Védelmi tartalékolás
- **Alkalmazkodás az üzemmódhoz**
  - Sziget, vagy hálózati kapcsolat
  - „Loss of Mains” (szigetüzem elleni védelem)
  - „Fault Ride Through” (hibás állapot áthidalása)

Egyszerűbb védelmi problémák

Felesleges működés (B irányítása szükséges)



Működés elmaradás (A árama lecsökken)



Vattenfall 2005

?

- Hagyományos védelmi funkciók alkalmazása – módosított védelmi funkciók – új elvek kidolgozása
- A hálózat topológia változása igényli-e a hagyományos védelmi stratégiák feladását?

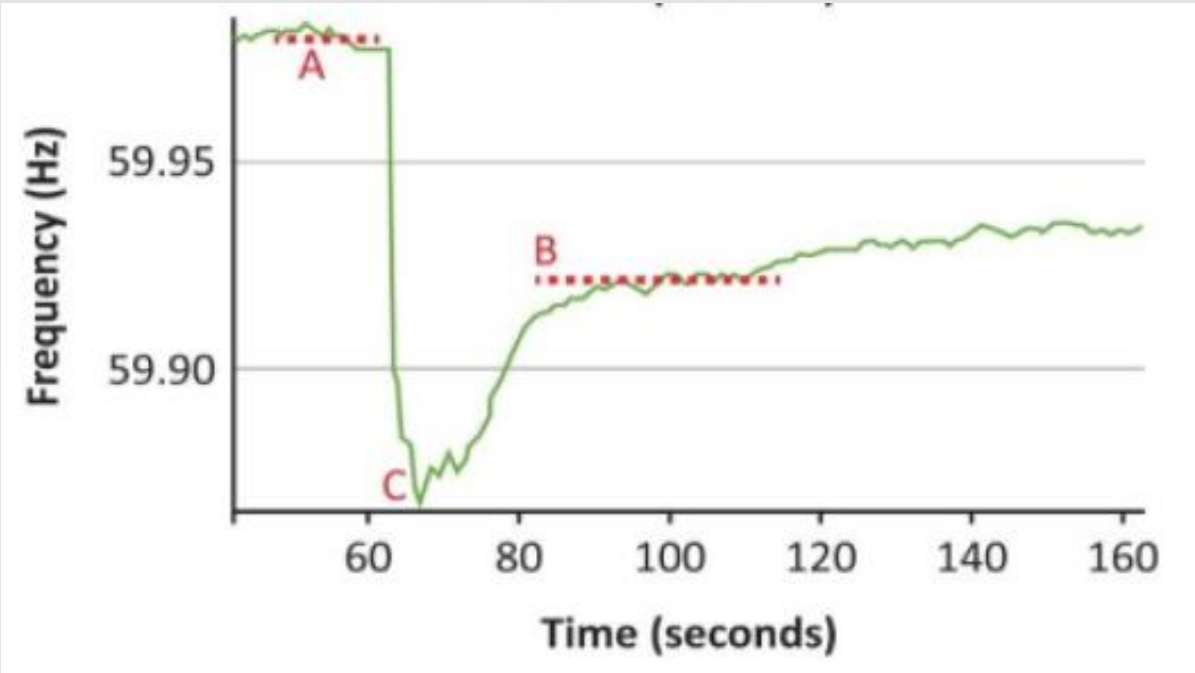
4 A védelmi funkciók megvalósítása

- Önálló védelmi funkciókkal (komplex védelmekben = jelen)
- Kommunikáción alapuló központi védelemben („smartgrid” = ? jövő ?)

Védelmi funkciók

- f>, f<, df/dt,
- U>, U<,
- vektorugrás!
- I>, I>> (+irányítás)
- ……..
- szinkrofazor
- energiairány
- differenciál/szakaszvédelem
- távolsági védelem
- ftk
- szinkron kapcsolás, szinkron ellenőrzés

Frekvencia védelem



Periódikus jelek frekvenciája

Egy periodikus jel

$$g(t) = g(t + T)$$

T a periódusidő

A frekvencia azt mutatja, hogy 1 időegységben hányszor van meg a periódusidő

$$f = \frac{1}{T}$$

Egy mérési módszer ezen alapul

Frekvencia mérés/1

Elve: pl.: két azonos értelmű nulla-átmenet között a processzor órajelének számolása

$$frekvencia[mHz] = \frac{1000}{T} = \frac{1000}{k_{clock}T_{clock}} = \frac{1000 * f_{clock}}{k_{clock}} = \frac{1000 * 8000000}{k_{clock}}$$

50 Hz-en: 20 ms => k_{clock}= 160000

Órajelek száma	Számított frekvencia (mHz)
159999	50000.3
160000	50000
160001	49999.6

Frekvencia mérés/1

A nulla-átmenet érzékelése:

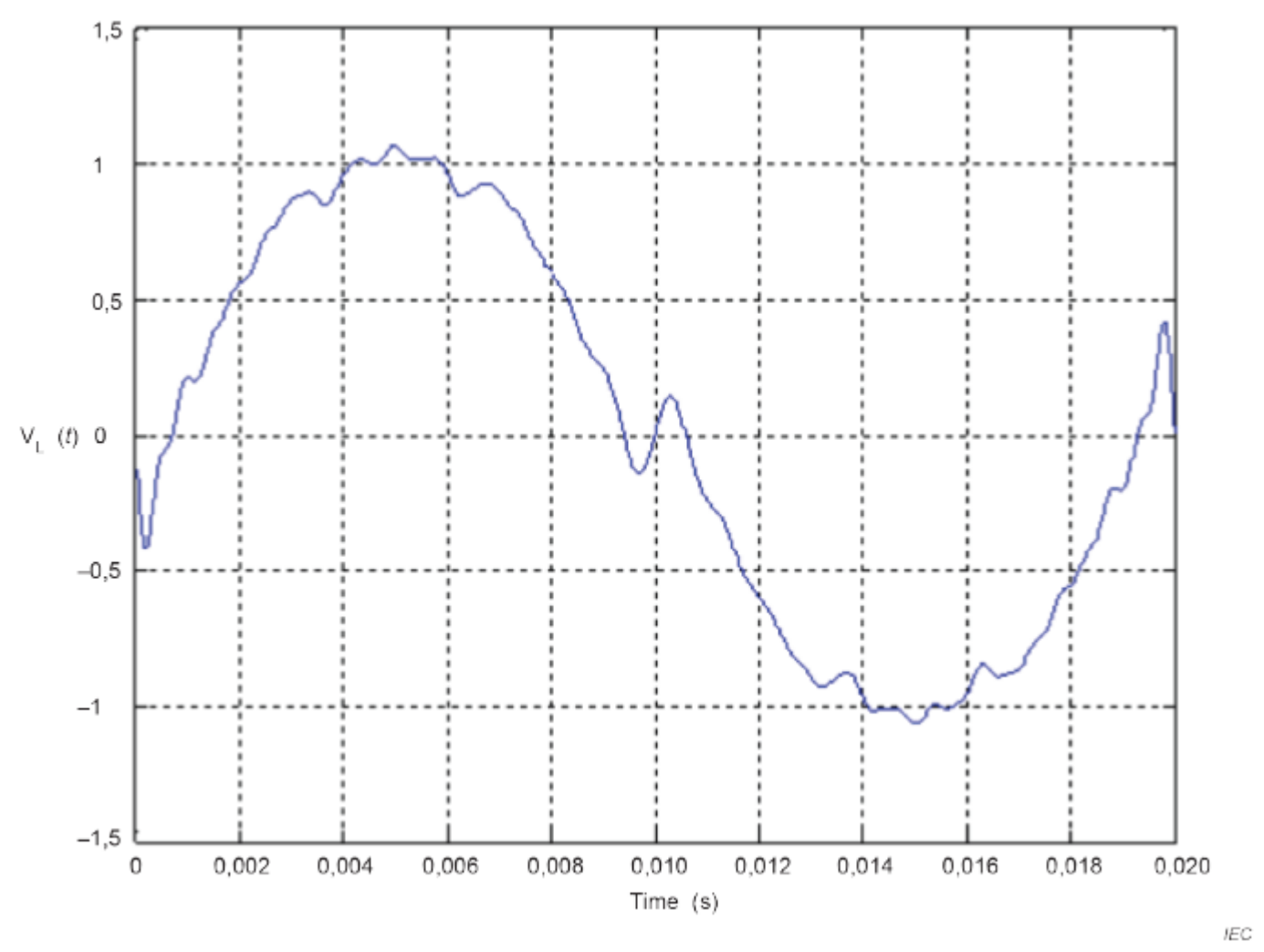
Korai processzoros készülékekben (pl. DFR)

- Fázisfeszültségek „keverése”
- „Négyszögesítés”
- Órajelek HW számolása

Modern megoldás:

- Nagyfrekvenciás mintavétel (2 kHz)
- Simító szűrés
- Nulla-átmenet interpolálása ellenkező előjelű két minta között
- Periódusidő= minták száma + interpolált idők

Egy algoritmus teszt az IEC 60255-181 szerint



Frekvencia mérés/1

Előnyök

- PONTOSSÁG

Hátrányok

- Hardver elemek
  - Összegző
  - Négyszögesítő
  - Processzor elem
- Értékelés (fél)periódusonként (simítás!)
- Számábrázolás (mérési tartomány)

Szinuszos jelek (forgó vektorok) frekvenciája

Egyenes vonalú mozgás $$s = s_0 + v_0 t + \frac{a}{2} t^2$$

Forgó mozgás $$\boldsymbol{\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{\beta}{2} t^2}$$

Szögsebesség $$\boldsymbol{\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 + \beta t}$$

Frekvencia $$\boldsymbol{f = \frac{1}{2\pi}\omega = \frac{1}{2\pi}\omega_0 + \frac{1}{2\pi}\beta t}$$

Szöggyorsulás $$\boldsymbol{\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \beta}$$

ROCOF $$\boldsymbol{\frac{df}{dt} = \frac{1}{2\pi}\beta}$$

Frekvencia mérés/2

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin(k\omega t)$$

$$F_0 = \frac{1}{T}\int_T f(t)dt$$

$$A_k = \frac{2}{T}\int_T f(t)\cos(k\omega t)dt$$

$$B_k = \frac{2}{T}\int_T f(t)\sin(k\omega t)dt$$

$$C_k = \frac{1}{2}(A_k - jB_k)$$

$$\varphi_k = -arctg(\frac{B_k}{A_k})$$

<u>Forgó koordináta-rendszerben</u> a vektor a frekvencia-eltérésnek megfelelően forog!

$$fr = 50 + \frac{\Delta\varphi}{2\pi\Delta t}$$

Frekvencia mérés/2

Előnyök

- PONTOSSÁ TEHETŐ pozitív sorrendű szűréssel
- „Folyamatos” mérés, jól simítható

Hátrányok

- Szoftver elemek
  - Fourier modulok
  - Pozitív sorrendű szűrés
  - Szögszámítás
- Számábrázolás (mérési tartomány)

Frekvencia mérés/3

Frekvencia mérés szélsőérték-kereső algoritmussal

- **Az alkalmazás okai:**
  - **„blackstart” generátor széles frekvencia tartományban igényel védelmet**
  - **Szigetüzemben a rendszer széles frekvencia tartományban igényel védelmet**
- **A frekvencia mérés a <u>fluxus növekedési</u> funkció melléktermége**

Frekvencia mérés/3

A feszültséget folyamatosan integráljuk, közben az egyen-komponenst szűrjük.

Ezen belül egy fél periódus integrálja:

$$\int_0^{T/2} U_\max * \sin(\omega t)dt = 2*\frac{1}{\omega}*U_\max = 2*\frac{1}{2\pi f}*U_\max = 2Flux_\max$$

Szélsőérték kereső algoritmussal meghatározandó:

- **A feszültség csúcsértéke (U_max)**
- **A feszültség integráljának a csúcsértéke (Flux_max)**

Ebből a frekvencia:

$$f = \frac{1}{2\pi}*\frac{U_\max}{Flux_\max}$$

Frekvencia mérés/3

Előnyök

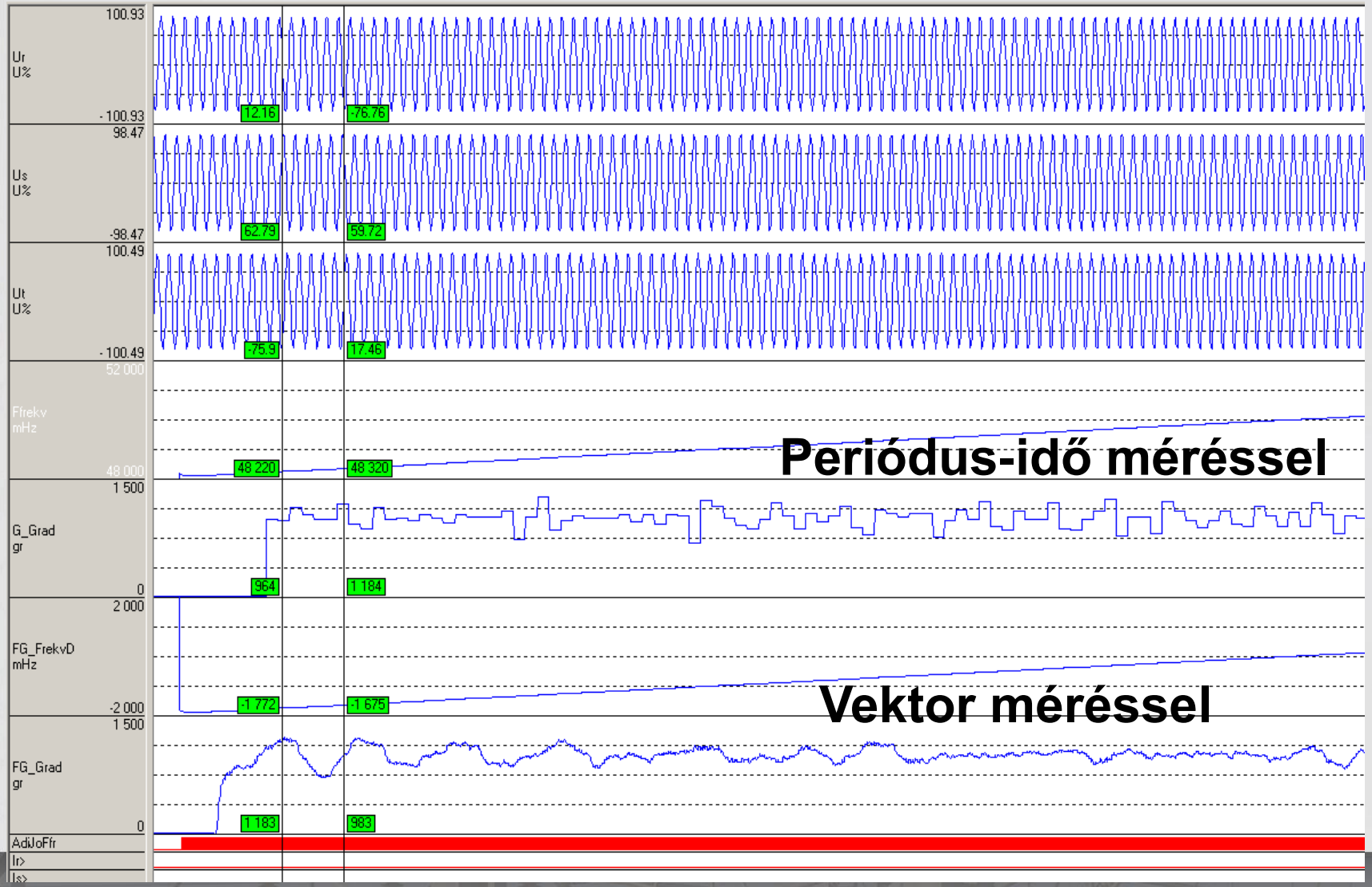
- Széles mérési tartomány
- Egyszerű algoritmus

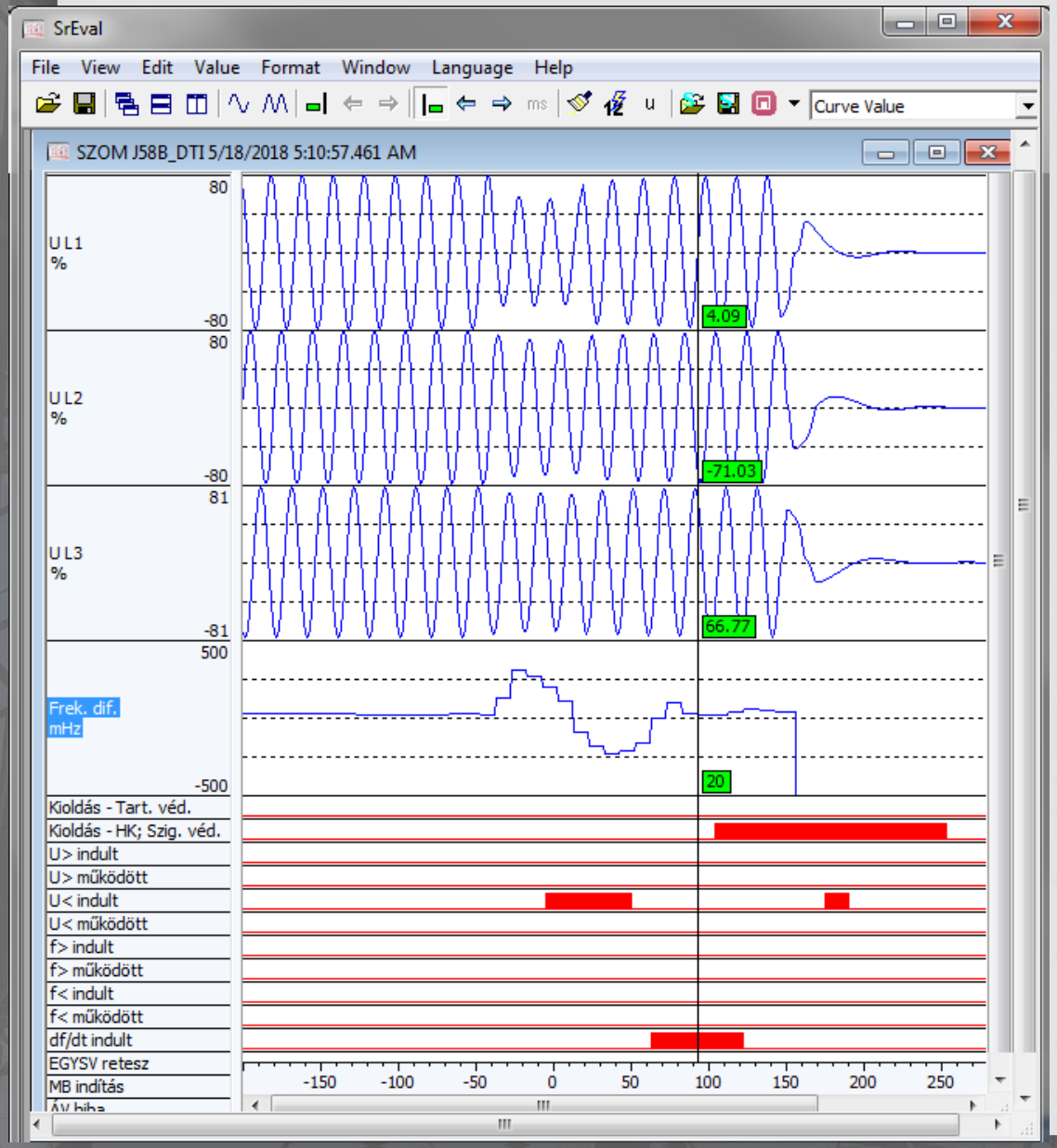
Hátrányok

- Pontatlan
- Szakaszos mérés

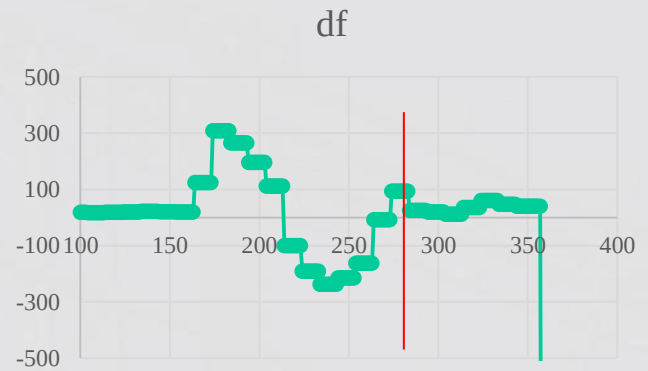
Alkalmazás a másik két módszer kiegészítéseként

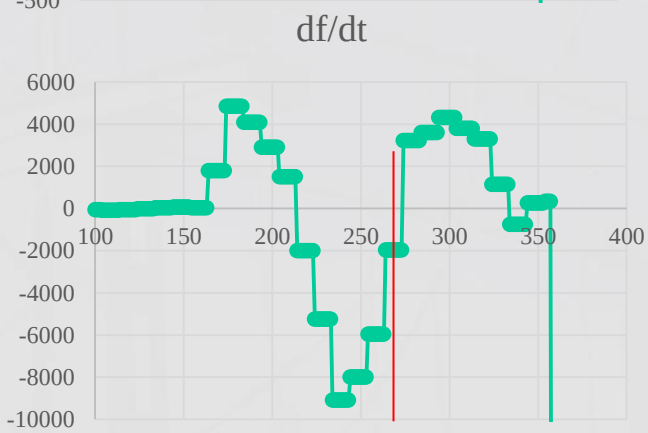
Frekvencia mérés összehasonlítás





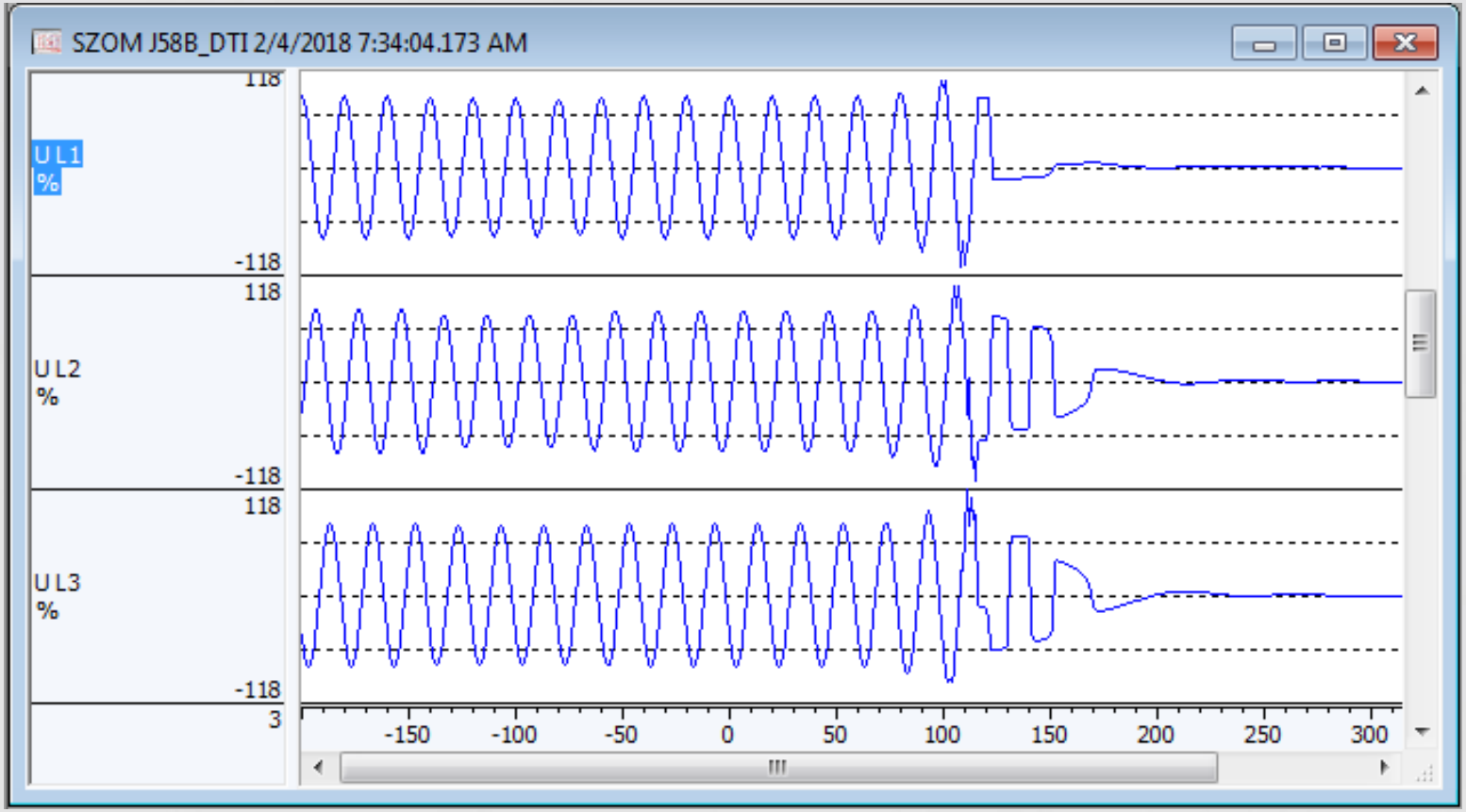
Egy napelemes inverter viselkedése





df/dt= (f(t)-f(t-3T) /3T

Egy napelemes inverter leállása



A frekvencia mérést befolyásoló tényezők:

- **Zárlatok**
- **Topológia változások**
- **Terhelés változások**
- **Generátor (inverter) szabályozások**
- **…**

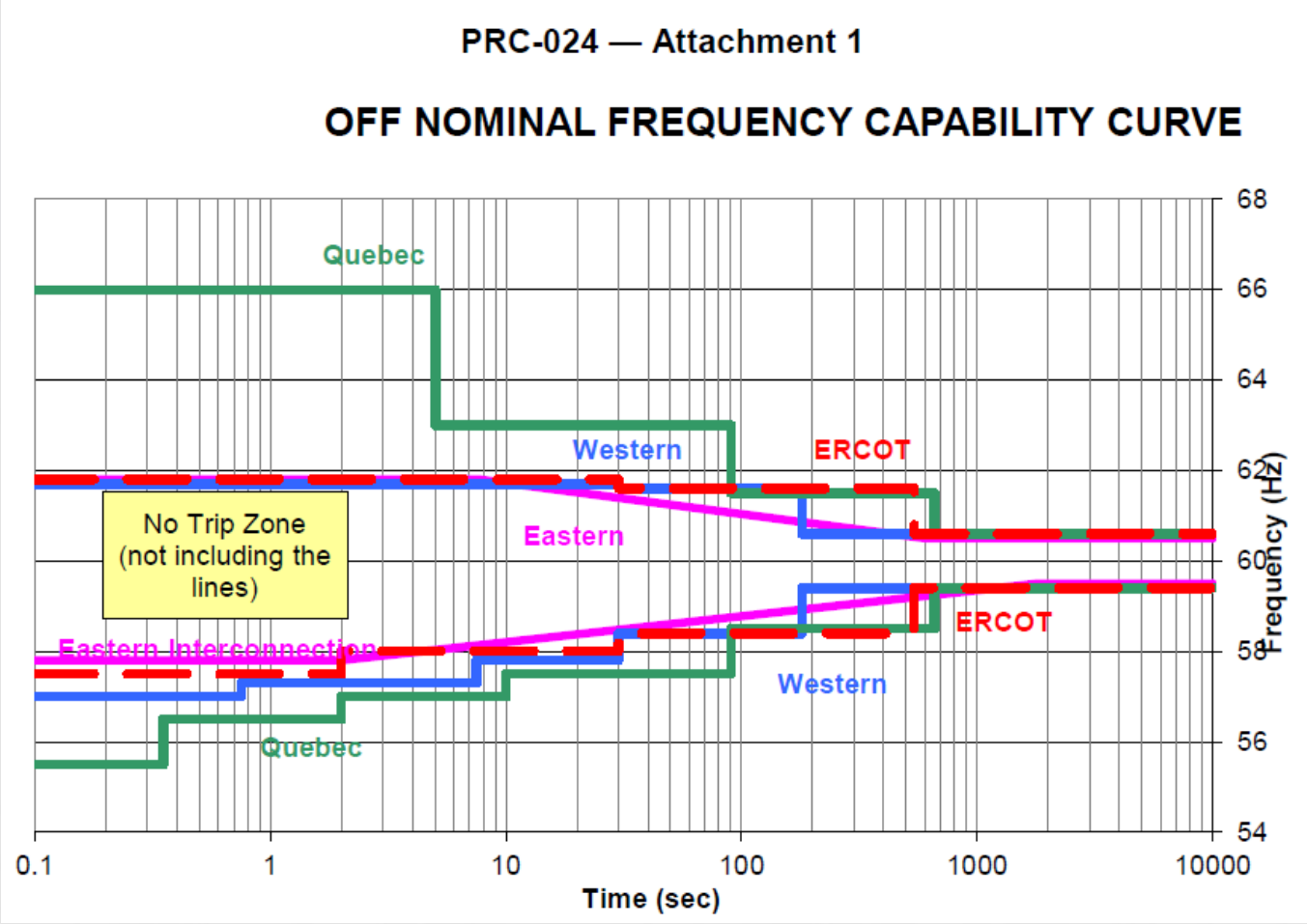
A ROCOF számítás (deriválás) kiemeli a „zajokat”.

Alul-áteresztő szűrés szükséges, ami további késleltetést okoz.

Kis inerciájú rendszerekben gyors mérésre lenne szükség.
Ez ellentmondásban van a pontossági igényekkel.

A frekvencia mérés „stabil” feszültségű pontokon megbízható.

Frekvencia védelem „zárlati áthidalóképessége”



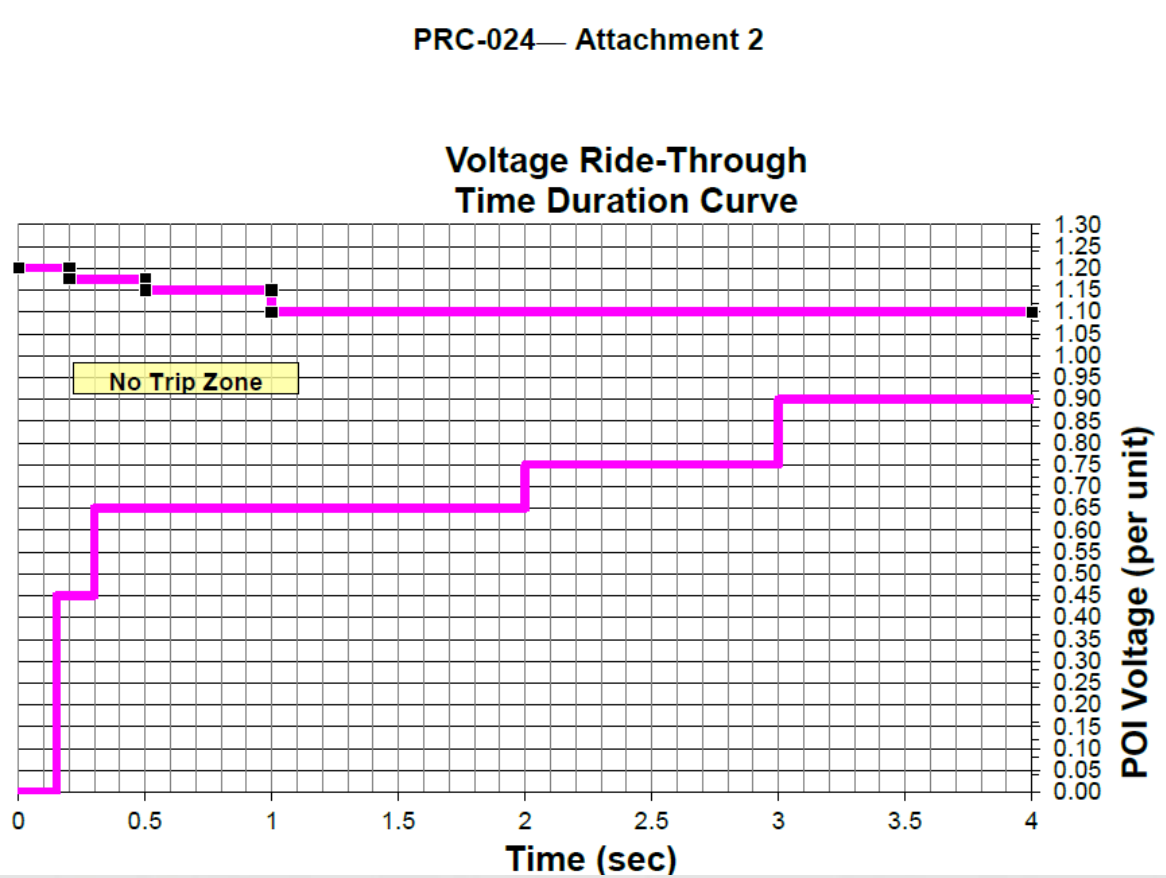
Feszültség védelem

„Közismert” mérési módszerek

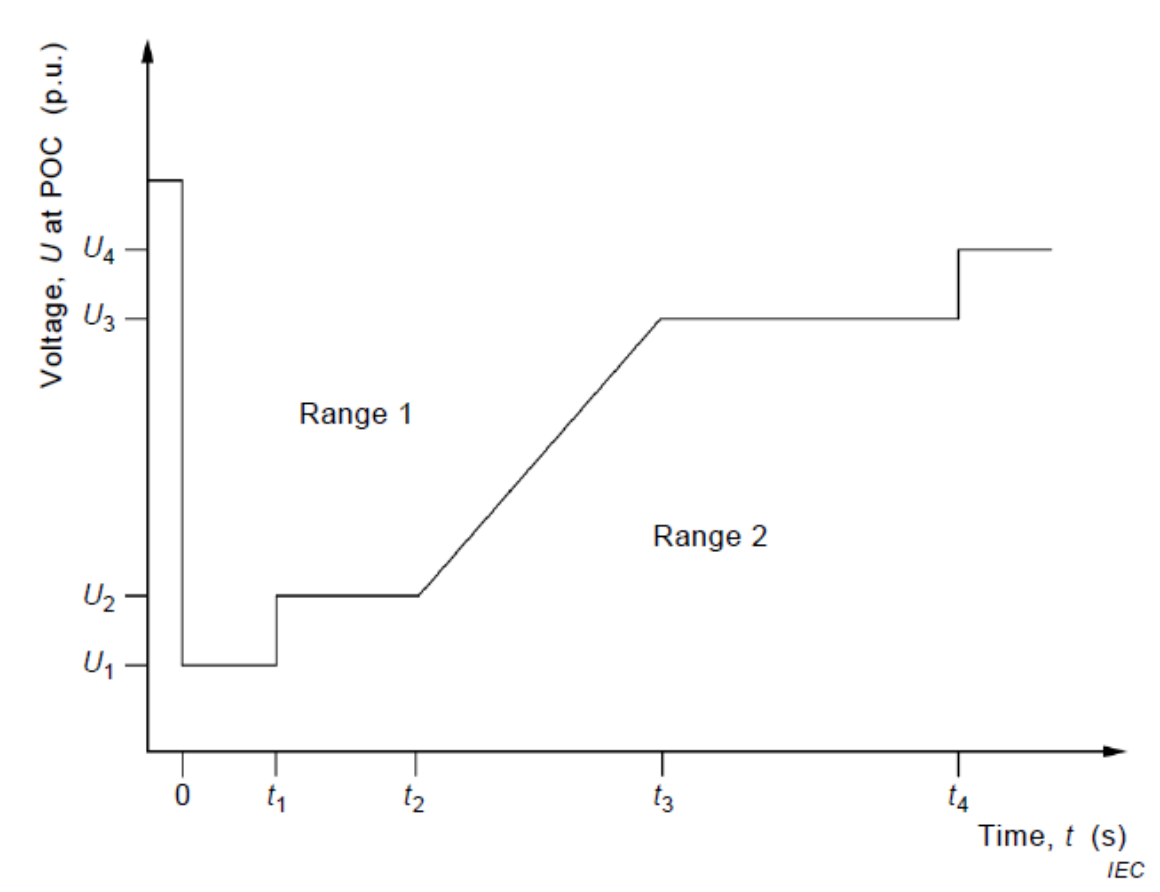
- egyenirányított középérték
- effektív érték
- Fourier alapharmonikus mérés

Algoritmus idő > T

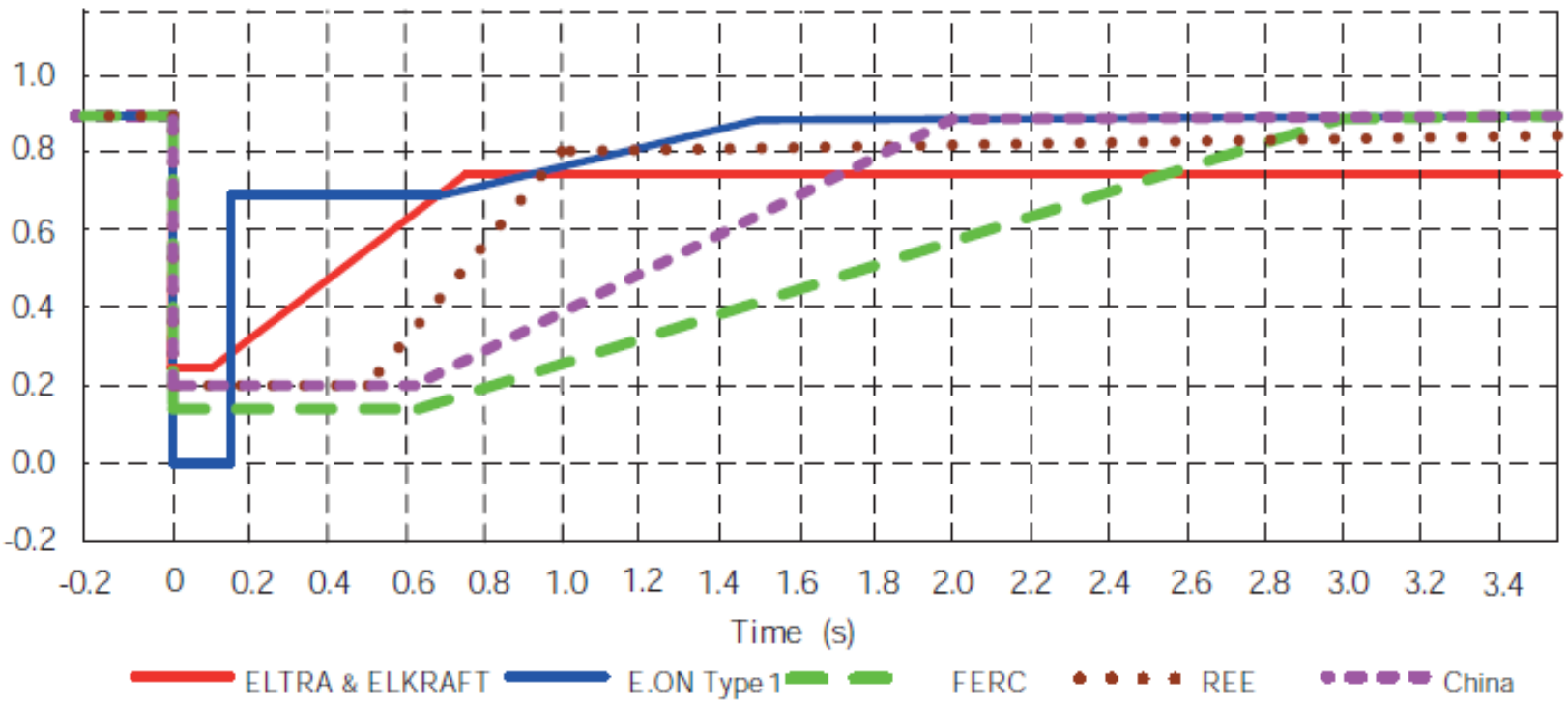
Feszültség védelem „zárlati áthidalóképessége”



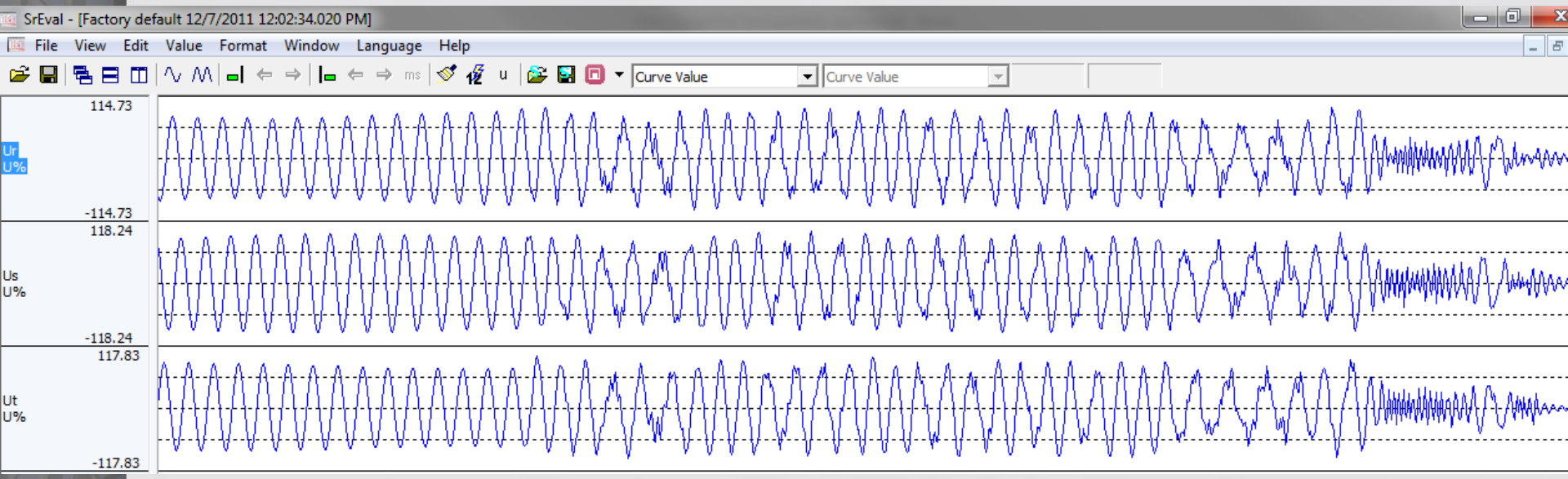
Feszültség védelem „zárlati áthidalóképessége”



Feszültség védelem „zárlati áthidalóképessége”



K…. 2011



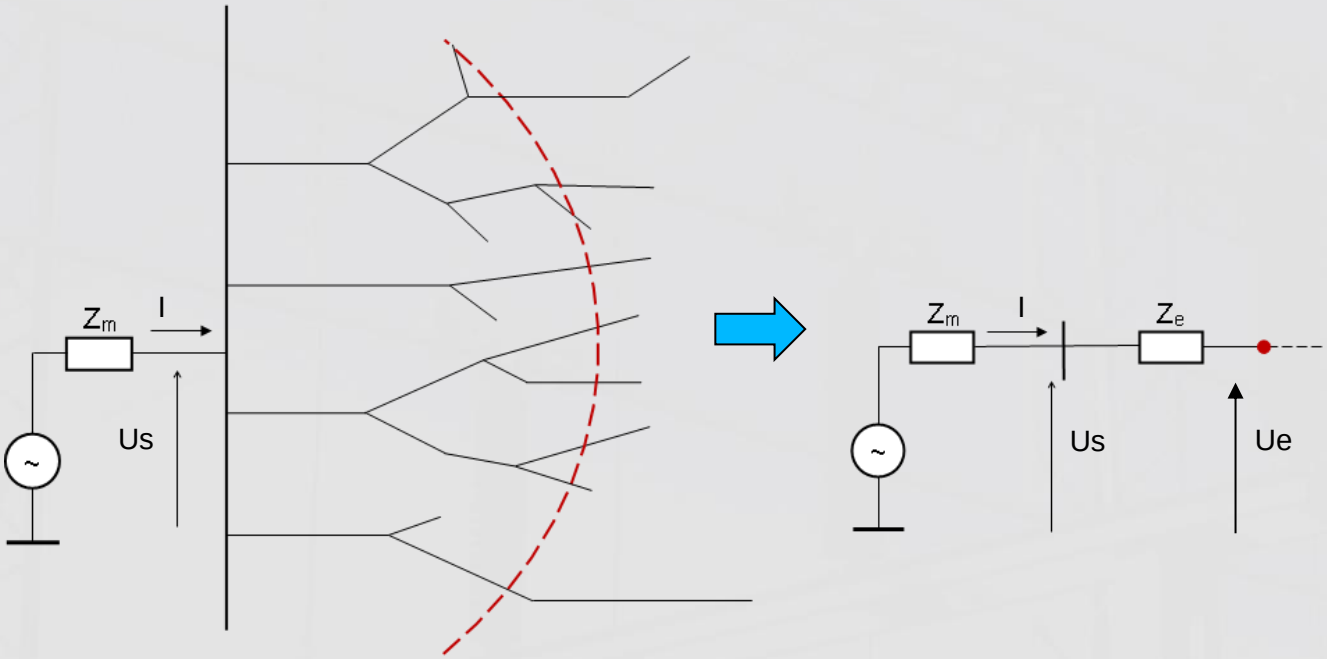
Feszültség = ?
Frekvencia = ?

?

- A hagyományos védelmi mérések elvei alkalmazhatók-e?
- Hogyan lehet a beállítási értékeket megállapítani?
- Szükség van-e új védelmi elvekre?
- Hozzá lehet-e szokni az új védelmi paraméterekhez?

Feszültségszabályozás

Feszültségszabályozás



?

A csatlakozó kiserőművek lényegesen megváltoztatják a feszültségprofilt

- **Következmények….?**
- **Más szabályozási igények (Petersen)?**

Szinkrofazorok védelmi alkalmazási lehetősége

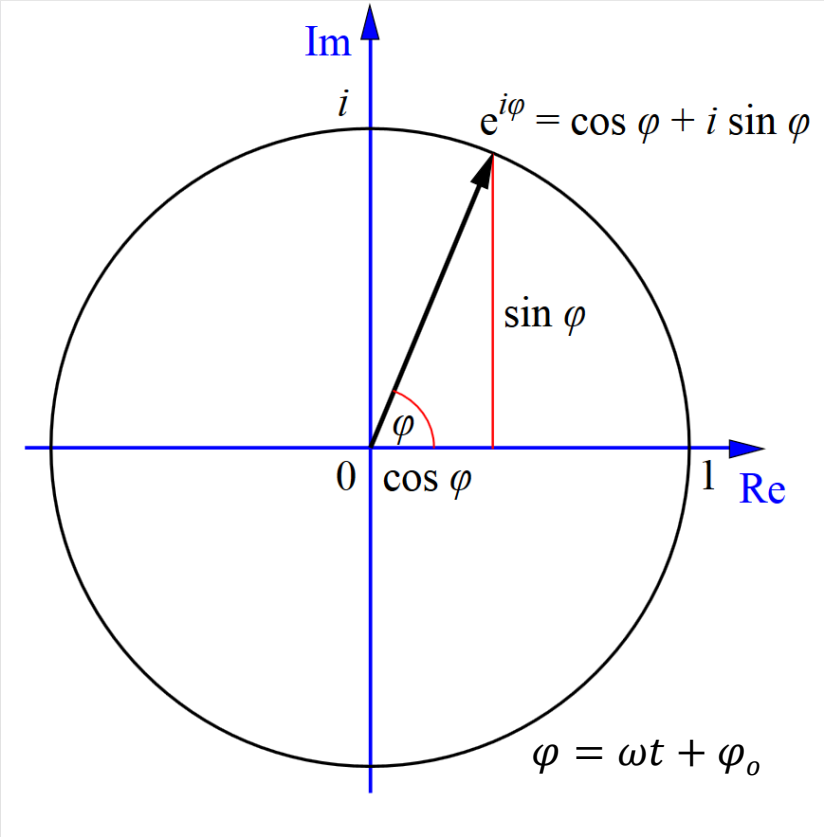
Vektor <-> fazor

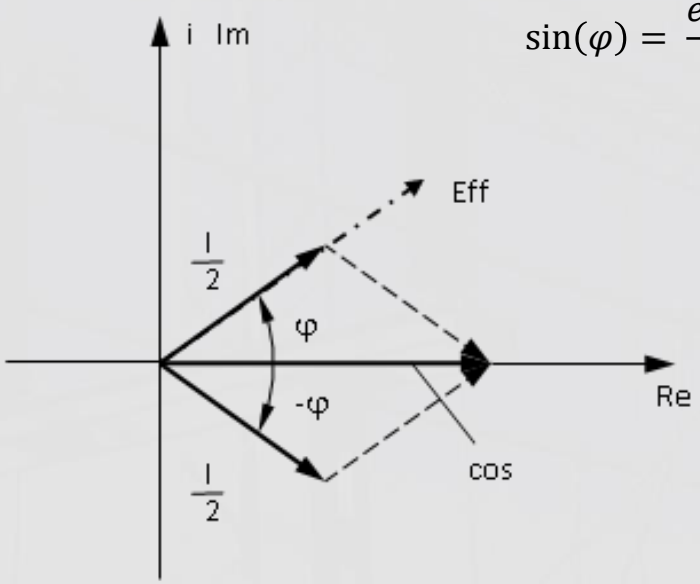
Vektorok (fazorok) és a szinuszos (koszinuszos) időfüggvények

Euler képlet:

$$\cos(\varphi) = \frac{e^{i\varphi} + e^{-i\varphi}}{2}$$

$$\sin(\varphi) = \frac{e^{i\varphi} - e^{-i\varphi}}{2i}$$





Két, ellentétesen forgó komplex vektor
Elég az egyiket követni
Ennek hossza legyen az effektív érték

Szinkrofazor

A Fourier algoritmus alkalmazása: feltétel a periodikus jel

$$u(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n cos(n\omega_1 t) + B_n sin(n\omega_1 t)]$$

A Fourier együtthatók:

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cos(n\omega_1 t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \sin(n\omega_1 t) dt$$

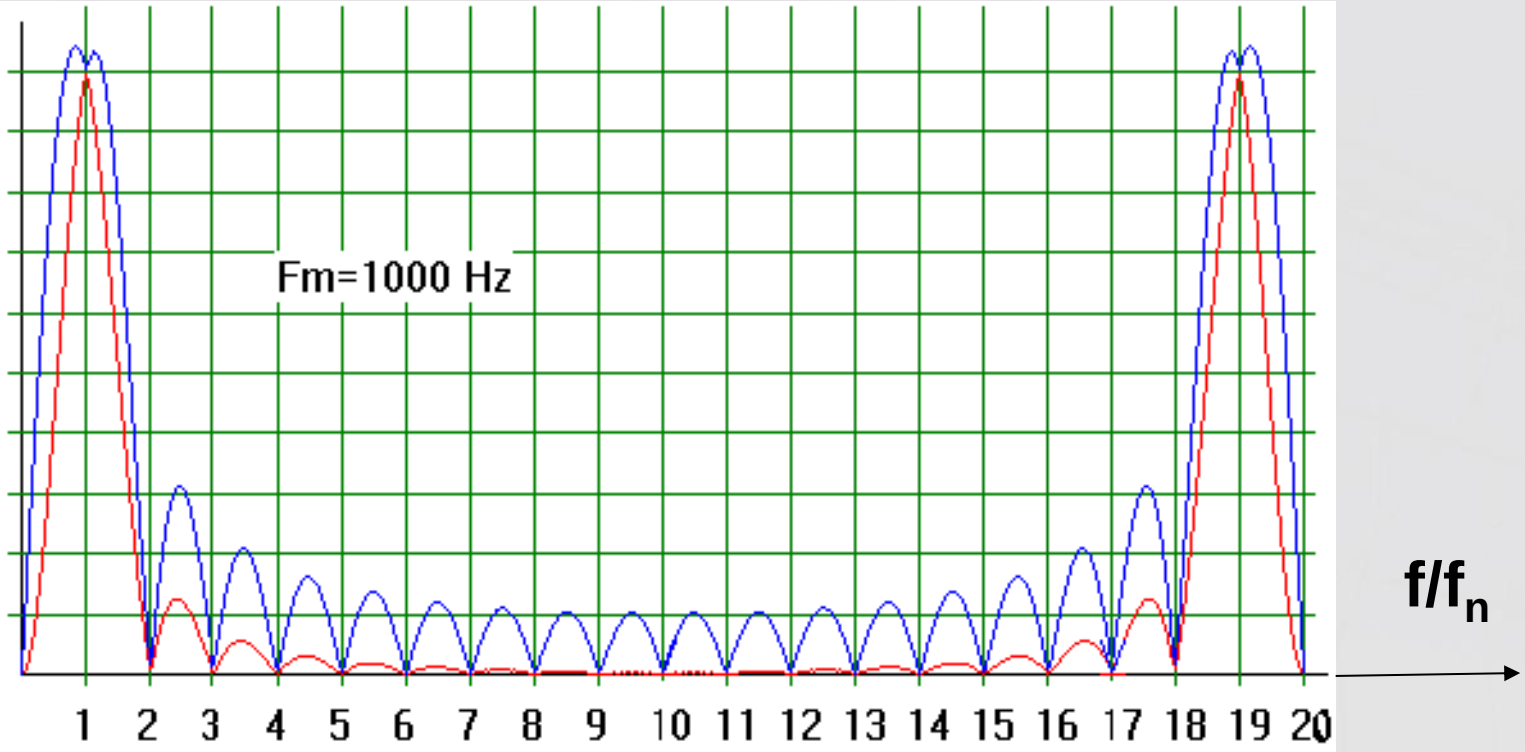
A Fourier együtthatók számítása:

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[u_k \cos(\omega_1 \left(t_0 + k \frac{T}{N} \right)) \right] = \sum_{k=0}^{N-1} [u_k a_k)]$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[u_k \sin(\omega_1 \left(t_0 + k \frac{T}{N} \right)) \right] = \sum_{k=0}^{N-1} [u_k b_k)]$$

$$U_1 = A_1 - jB_1$$

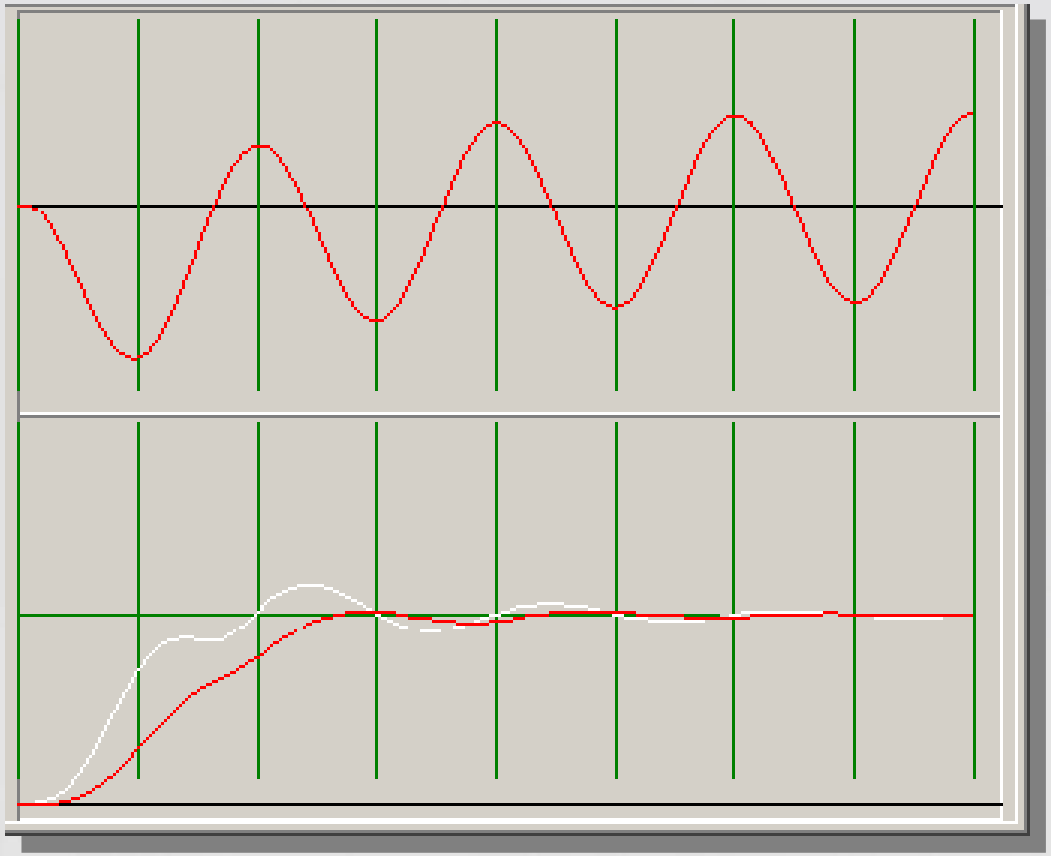
Az alapharmonikus Fourier szűrő frekvenciamenete



A Fourier szűrő tranziensei

Bemenő áram

Számított Fourier vektor nagyság



Szinkrofazor védelmi funkció

- GPS-vezérelt mintavételezés
- Fourier analízis
- vektor számítás (+frekvencia +ROCOF)
- kommunikáció
- központi adatgyűjtés
- központi kiértékelés
- parancs kommunikáció
- beavatkozás

?

- **Mikor fejlődik a technika annyit, hogy az új elvek alkalmazhatók lesznek (szenzorok, adatgyűjtés, kommunikáció, beavatkozó parancsátadás, …)?**

5 „Smart grid”

„Smart grid”

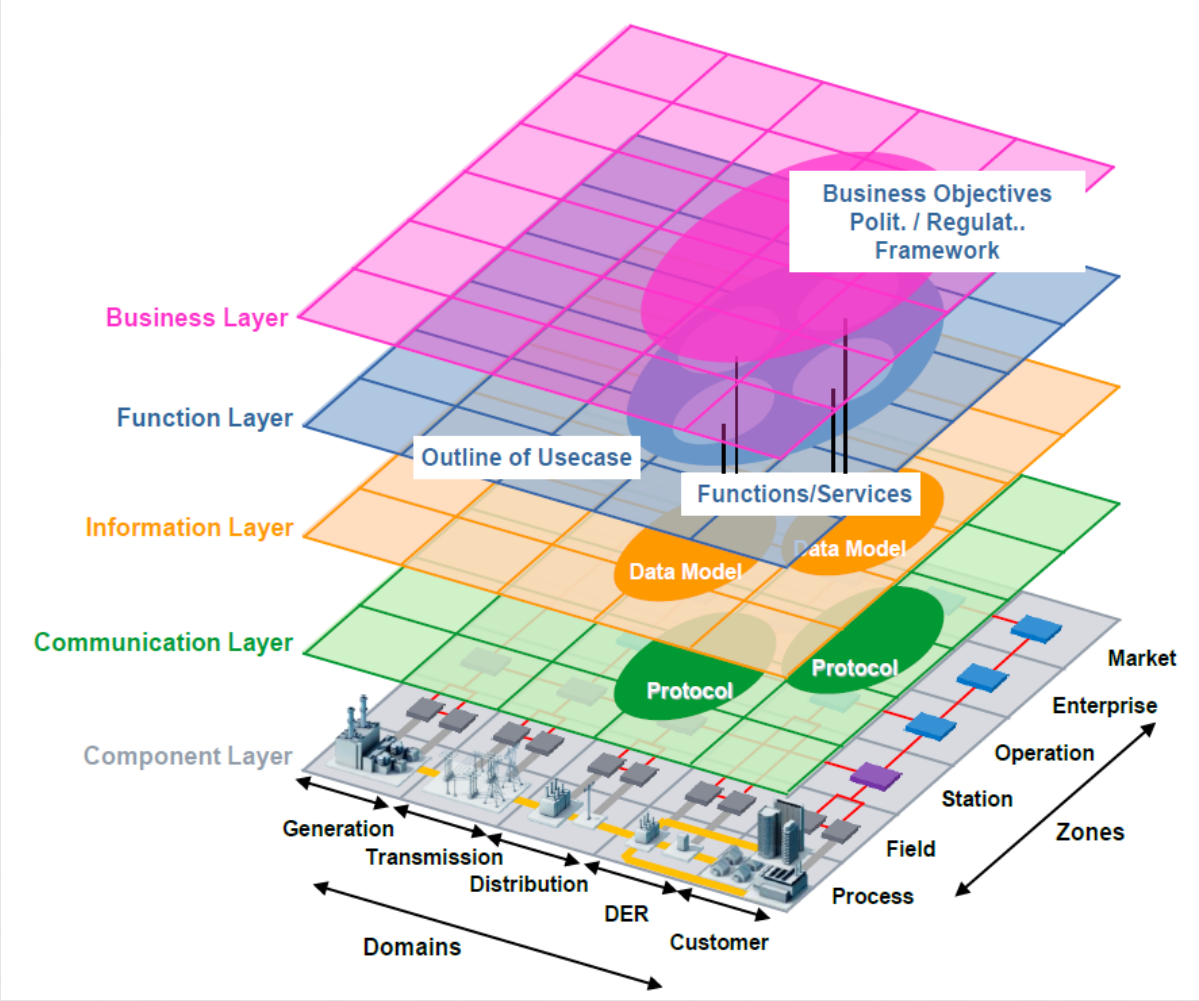
„Smart grid” = Energairendszer + Információs rendszer

→ Kiberbiztonság →

A „Smart grid” rendszer alapelemei:

- Információ gyűjtés intelligens készülékekkel,
- Információ kommunikálás,
- Az információ feldolgozása és
- Beavatkozás.

„Smart grid” rendszer



CIRED 2013

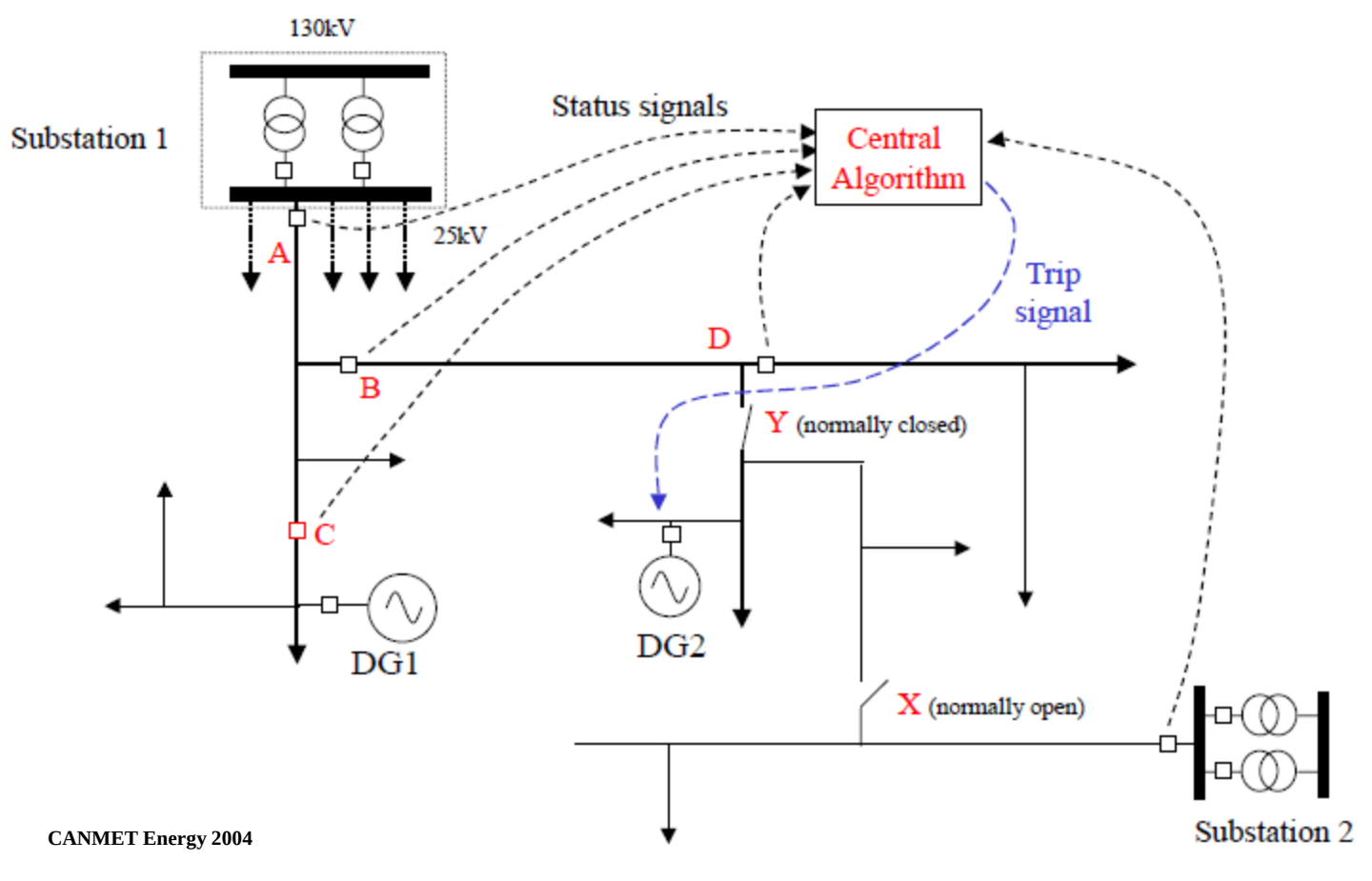
Általános célok:

- **Az energiarendszer megbízhatóságának, biztonságának, stabilitásának, hatékonyságának növelése,**
- **A hálózat és az energiaforrások működésének dinamikus optimalizálása, veszteségek minimalizálása, feszültségesések optimalizálása, zárlati teljesítmény szabályozása,**
- **Az „elosztott generátorok” és a megújuló energiaforrások optimális integrálása,**
- **A fogyasztás befolyásolása, optimalizálása,**
- **A minőségi jellemzők szabályozása,**
- **Mérések, státusz-figyelések optimalizálása,**
- **Energia-tárolás és csúcsterhelés vezérlése.**
- **…**

A védelmekre vonatkozó célok lehetnek:

- védelmi koordinálás, adaptivitás
- szigetüzem kezelése,
- szinkronizálás,
- generátorok viselkedésének befolyásolása a normálistól eltérő üzemállapotokban,
- hálózat helyreállítás védelmi működések után,
- hibahely meghatározás,
- terheléskorlátozás,
- csillagpont kezelés,
- …

Szigetüzem érzékelése



„Smart grid” elemek a jelenlegi védelmi rendszerben:

- védelmi kommunikáció (távolsági védelemben)
- szakaszvédelem
- gyűjtősín differenciál védelem
- IEC 61850 „process bus”
- felkészülés „merging unit” alkalmazására
- IED-k
- együttműködés az irányítástechnikai rendszerrel
- …

?

Záró gondolatként **két fontos következtetés**:

1) Még nem látjuk tisztán, mi szükséges a megújuló energiaforrások nagymértékű elterjedéséhez. Ehhez tudást, gyakorlati tapasztalatokat, eszközöket, iránymutatást és anyagi ráfordítást kell biztosítani.
2) Az elméleti tudás és a gyakorlati tapasztalat (külön-külön) önmagukban nem elegendők. A megoldáshoz együttműködés szükséges. A probléma túl komplex ahhoz, hogy szétforgácsolt próbálkozások eredményre vezessenek.

(Szabadon az IEC után.)

?

Talán a holnapi fórum…