

Tárgy weblap:

<https://oktatok.reak.bme.hu/tantargyak/atomenergia-es-fenntarthato-fejlodes/>

9. előadás

**A villamosenergia-rendszer felépítése és működése
A villamosenergia-termelés költségei**

2019/2020. tanév őszi félév

Prof. Dr. Aszódi Attila, Dr. Yamaji Bogdán, Tóth Barnabás
BME NTI

Villamos energia

- Az erőművek fő feladata, hogy a természetben előforduló energiahordozókat jobban hasznosítható, „nemesített” energiahordozókká (hő, mechanikai ill. elektromos energiává) alakítsák
- Villamos energia:
 - általánosan felhasználható (világítás, fűtés, közlekedés, mozgatás, hűtés), fogyasztása jól szabályozható, egyszerűen szállítható
 - előállítási költsége nagy, környezetszennyező, nem tárolható

A villamosenergia-rendszer (VER)

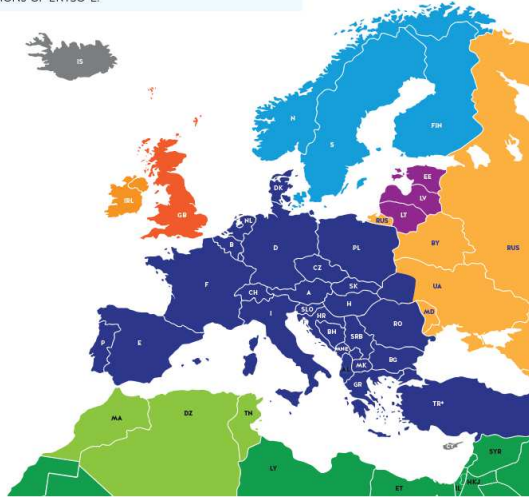
- Történelem
 - XIX. sz. vége: horizontális és vertikális fejlődés (új fogyasztók bekapcsolása ill. a meglévő hálózatokon az ellátás mélyítése)
 - Magyarország :
 - 1882: Temesvár (az első erőmű Mo. akkori területén)
 - 1920-as évekig: bányae erőművek, kis vízerőművek
 - II. vh. után: egységes VER kiépítése főleg szénbázisú erőművekkel (Mátra, Ajka, Inota)
 - 1960-70: szénhidrogén alapú erőművek (Dunamenti, Tiszai)
 - 1982-87: Paks
 - 2000-es évek: kombinált ciklusú alaperőművek

A villamosenergia-rendszer (VER)

- Nemzetközi együttműködő erőműrendszerek:
 - 1993-ig: KGST VERE (villamosenergia-rendszerek együttműködése). Magyarország is tagja volt.
 - Megszűnése után: CENTREL (Lengyelo., Cseho., Szlovákia, Magyaro., Németo. keleti része). Központja Prágában található (CDO). Nyugat-Ukrajna, Bulgária és Románia is egy rendszerben maradt.
 - Európai hálózat: UCPTE – 1999-től UCTE – 2009-től ENTSO-E. Magyarország villamosenergia-rendszere 1996 óta jár ezzel párhuzamosan.

- **Kontinentális Európa**
Continental Europe
- **Észak-Európa**
Northern Europe
- **Balti országok (szinkron üzemen az UPS/IPS rendszerrel)**
Baltic countries (synchronously interconnected with UPS/IPS system)
- **Nagy-Britannia**
Great Britain
- **Ír-sziget**
Ireland
- **Különálló szigetek**
Isolated systems
- **UPS/IPS szinkronrendszer**
UPS/IPS synchronous system
- **Kontinentális Európa rendszerével szinkron üzemen működő villamosenergia-rendszer**
Power system synchronously interconnected with the power system of Continental Europe
- ☑ **ENTSO-E-tag**
ENTSO-E member
- ☑ **ENTSO-E megfigyelő tag**
ENTSO-E observer member
- ☒ **Nem ENTSO-E-tag**
Not member of ENTSO-E

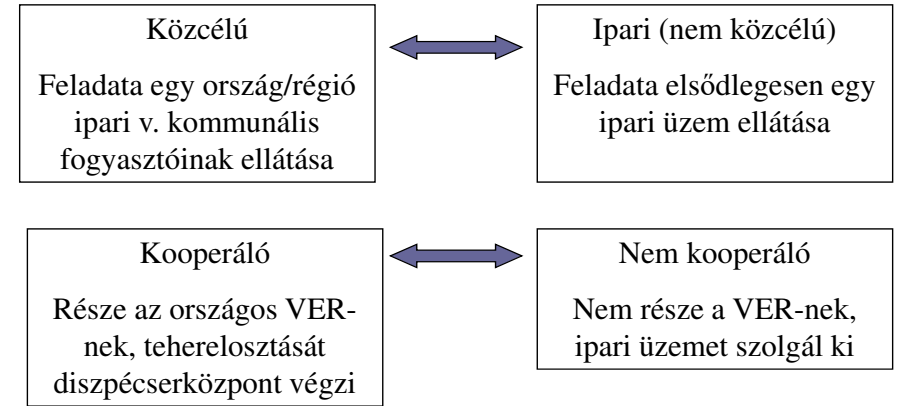
AZ ENTSO-E SZINKRONTERÜLETEIN:
SYNCHRONOUS REGIONS OF ENTSO-E:



A Magyar VER 2016. évi statisztikai adatai, MAVIR
5

A villamosenergia-rendszer (VER)

Erőművek csoportosítása: több szempont szerint lehetséges



A villamosenergia-rendszer (VER)

- Erőművek csoportosítása:
 - Felhasznált tüzelőanyag fajta alapján:
 - szén
 - szénhidrogén
 - nukleáris
 - megújuló
- } energiaforrásokat hasznosító erőművek
- Kapcsolás alapján:
 - Kondenzációs erőmű (KE)
 - Fűtőerőmű (FE)
 - Fűtőmű (FM)

A villamosenergia-rendszer (VER)

- Erőművek csoportosítása: kihasználás alapján:
 - Alaperőmű (pl. Paksi Atomerőmű):
 - csúcskihasználási időtartama több, mint 5500 óra,
 - korszerű, jó hatásfokú, olcsón üzemelő erőművek.
 - Menetrendtartó erőművek (pl. Mátrai, Dunamenti)
 - követik a villamosenergia-igény változásait, terhelésük rugalmasan, tág határok között változtatható
 - időnként a régebbi alaperőműveket alakítják át ilyenné
 - Csúcserőművek:
 - villamos csúcsfogyasztás időszakában üzemelnek
 - csúcskihasználási óraszámuk 1500-2000 óra
 - alacsony beruházási költségű erőművek (de drágán üzemelnek)

A magyar villamosenergia-rendszer

RENDSZERSZINTŰ KOORDINÁCIÓBAN RÉSZTVEVŐ ERŐMŰVEK

POWER PLANTS TAKING PART IN SYSTEM LEVEL COORDINATION



Fenntartható fejlődés és atomenergia

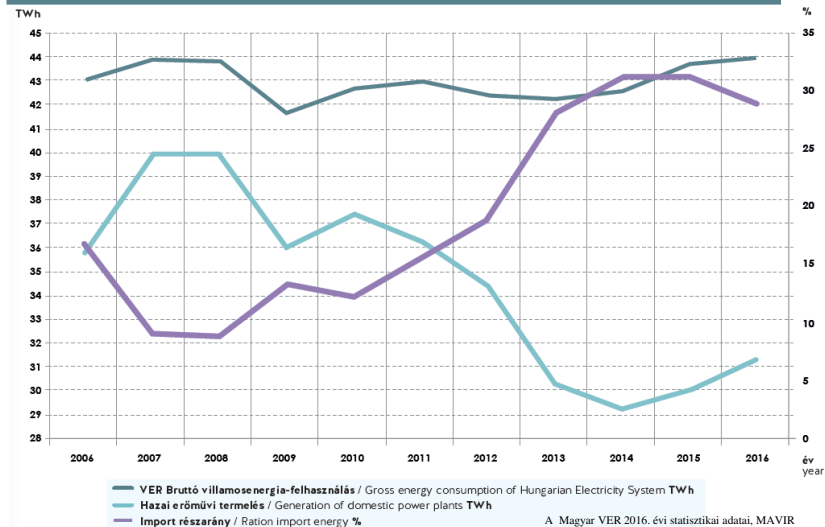
Dr. Aszódi Attila, BME NTI

A Magyar VER 2016. évi statisztikai adatai, MAVIR 9

A magyar villamosenergia-rendszer

TELJES BRUTTÓ VILLAMOSENERGIA-FELHASZNÁLÁS, A HAZAI TERMELÉS, ÉS AZ IMPORT ENERGIÁRÉSZARÁNYA 2006-2016

TOTAL GROSS ELECTRICITY CONSUMPTION, GENERATION OF DOMESTIC POWER PLANTS, RATIO OF IMPORT ENERGY 2006-2016



— VER Bruttó villamosenergia-felhasználás / Gross energy consumption of Hungarian Electricity System TWh
 — Hazai erőművi termelés / Generation of domestic power plants TWh
 — Import részarány / Ratio import energy %

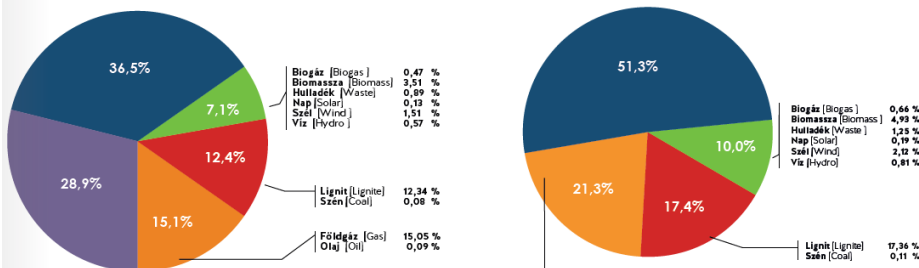
A Magyar VER 2016. évi statisztikai adatai, MAVIR

10

A magyar villamosenergia-rendszer

A TELJES BRUTTÓ VILLAMOSENERGIA-FELHASZNÁLÁS FORRÁSMEGOSZLÁSA 2016
SOURCES OF THE TOTAL GROSS ELECTRICITY CONSUMPTION 2016

A TERMELT HAZAI VILLAMOS ENERGIÁR MEGOSZLÁSA 2016
SOURCES OF DOMESTIC ENERGY PRODUCTION 2016



Teljes bruttó villamosenergia-felhasználás / Total gross electricity consumption: 44035,5 GWh
 Hazai termelés / Domestic energy production: 31310,5 GWh
 Import energia / Import energy: 12725 GWh



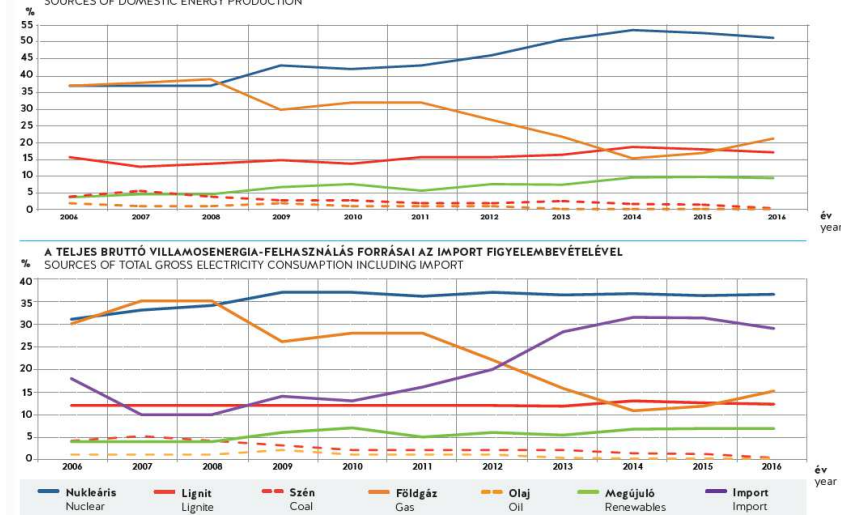
Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

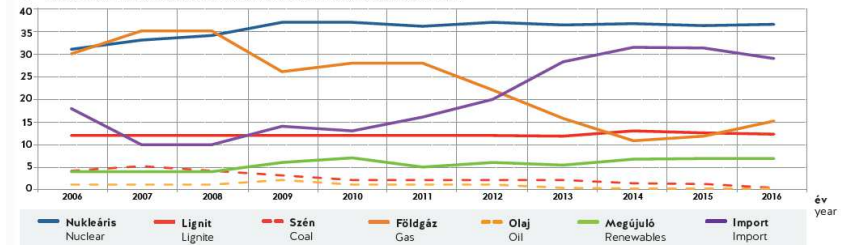
11

A magyar villamosenergia-rendszer

A TERMELT HAZAI VILLAMOS ENERGIÁR MEGOSZLÁSA
SOURCES OF DOMESTIC ENERGY PRODUCTION



A TELJES BRUTTÓ VILLAMOSENERGIA-FELHASZNÁLÁS FORRÁSAI AZ IMPORT FIGYELEMBEVÉTELÉVEL
SOURCES OF TOTAL GROSS ELECTRICITY CONSUMPTION INCLUDING IMPORT



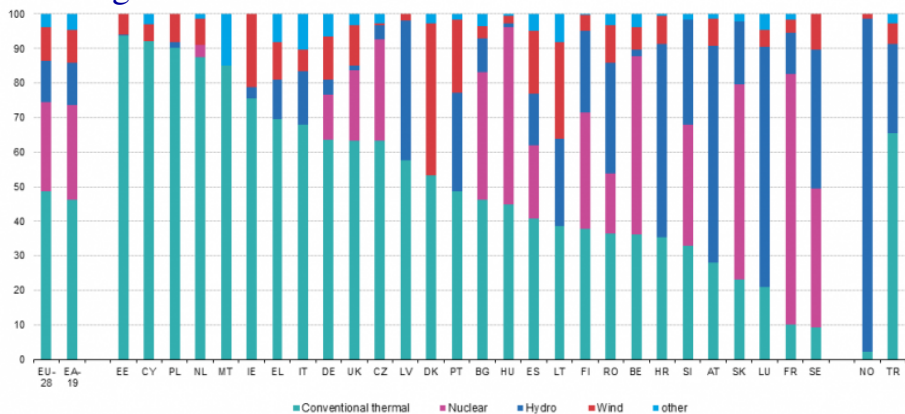
Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

A Magyar VER 2016. évi statisztikai adatai, MAVIR

12

Energiahordozó-szerkezet nemzetközi összehasonlításban



Contribution of the sources to the production in %						
	EU-28		Eurozone 19			
	2014	2015	2016	2014	2015	2016
Conventional thermal	47.6	48.1	48.6	44.2	45.8	46.2
Nuclear	27.4	26.4	25.8	29.7	28.7	27.5
Hydro	13.2	11.9	12.0	13.4	11.2	12.2
Wind	8.3	9.7	9.7	8.2	9.5	9.5
Solar	3.2	3.5		4.0	4.2	
Geothermal	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
Other	0.1	0.2		0.2	0.2	

Primenergia-megosztás a villamosenergia termelésben

Eurostat 2016

** non available data

13

A hazai erőművek adatai

Rendszerintű koordinációban résztvevő erőművek Power plants taking part in system level coordination									
	NBP Nominal trial operation [MW]	BT IC [MW]	ÁH CL [MW]	Rtá ACC [MW]		NBP Nominal trial operation [MW]	BT IC [MW]	ÁH CL [MW]	Rtá ACC [MW]
PAKS ¹⁷	0	2 000,0	0,0	2 000,0		0	30,0	0,0	30,0
TISZA II. ¹⁵	0	900,0	900,0	0,0		0	47,1	47,1	0,0
DUNAMENTI GT1 (14 gép) ¹	0	145,0	0,0	145,0		0	23,0	0,0	23,0
DUNAMENTI GT2 (15, 16, 17 gép) ¹⁷	0	241,0	0,0	241,0		0	23,0	0,0	23,0
DUNAMENTI GT3 (7, 8 gép) ¹⁵	0	407,7	0,0	407,7		0	23,0	0,0	23,0
MÁTRA I. ¹	0	200,0	30,0	170,0		0	47,4	20,4	27,1
MÁTRA II. ¹⁷	0	684,0	0,0	684,0		0	54,4	34,6	19,9
MÁTRA PV. ¹	0	16,0	0,0	16,0		0	49,0	3,0	46,0
GÖNYÜ ¹⁵	0	433,0	0,0	433,0		0	61,3	3,0	58,3
CSEPEL ¹⁵	0	292,0	10,0	282,0		0	89,3	5,0	84,3
KELENFÖLD ¹	0	116,0	4,9	113,1		0	19,0	3,0	16,0
KISPESTI GT. ¹	0	127,9	0,0	127,9		0	48,2	0,0	48,2
ÚJPESTI GT. ¹	0	49,9	0,0	49,9		0	53,1	0,0	53,1
DÖKE ¹	0	10,2	0,0	10,2		0	49,7	0,0	49,7
LŐRINCI GT. ¹	0	113,3	0,0	113,3		0	42,3	0,0	42,3
LITERI GT. ¹	0	120,0	0,0	120,0		0	10,1	0,0	10,1
SAJÓSZÖGEDI GT. ¹	0	120,0	0,0	120,0		0	10,1	0,0	10,1
OROSzlány ¹⁵	0	240,0	240,0	0,0		0	7,78	1 484,6	6 293,5
PÉCS ¹	0	70,0	35,0	35,0		0	64,5	0,0	64,5
PANNONGREEN ¹	0	49,9	0,0	49,9		0	264,9	64,5	200,4
AJKA ¹	0	101,6	53,6	48,0		3,0	468,4	7,0	461,4
BAKONY GT 12. ¹⁷	0	116,0	0,0	116,0		3,0	797,8	71,5	726,3
BÖNY SZELERŐMŰPARK	0	25,0	0,0	25,0		3,0	8 575,9	1 556,1	7 019,8
Összesen / Total	0,0	7 778,1	1 484,6	6 293,5		3,0	8 575,9	1 556,1	7 019,8

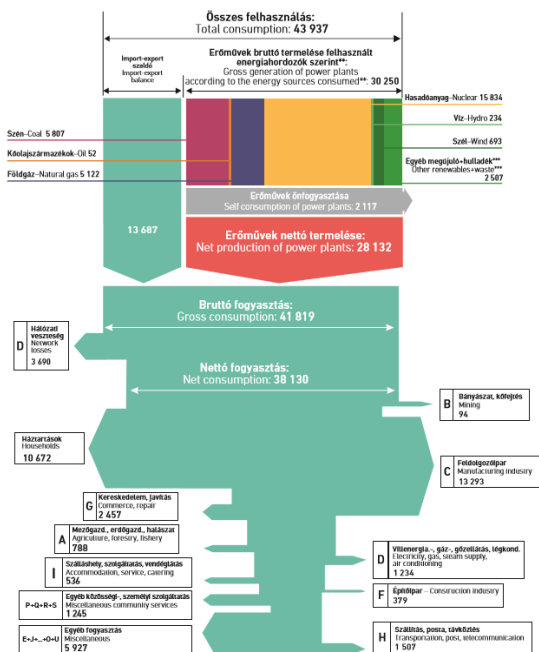
Rendszerintű koordinációban nem résztvevő erőművek Power plants not taking part in system level coordination				
ISD POWER	0,0	64,5	0,0	64,5
Kiserőművek / Total small power plants	0,0	264,9	64,5	200,4
Megújuló kiserőművek / Total renewable power plants	3,0	468,4	7,0	461,4
Összesen / Total	3,0	797,8	71,5	726,3
VER Összesen / Hungarian Electricity System, total	3,0	8 575,9	1 556,1	7 019,8

Magyarzat/Note

A Magyar VER 2016. évi statisztikai adatai, MAVIR

P Primer szabályozásba bevont termelő / Generator involved in primary control
S Szekunder szabályozásba bevont termelő / Generator involved in secondary control
T Tercier szabályozásba bevont termelő / Generator involved in tertiary control
szk. Szabályozó központ / Virtual Power Plant

Áramtermelés és -fogyasztás folyamatábrája, 2015



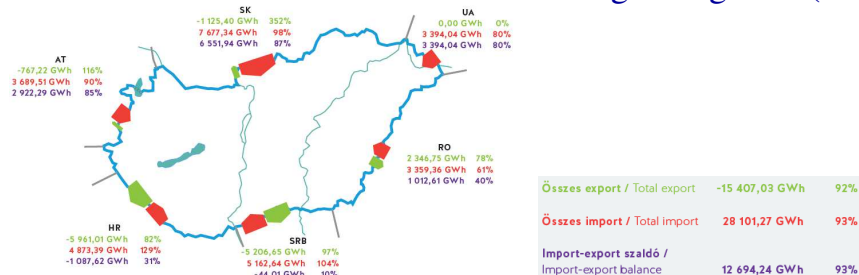
A Magyar VER 2015. évi statisztikai adatai, MAVIR

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

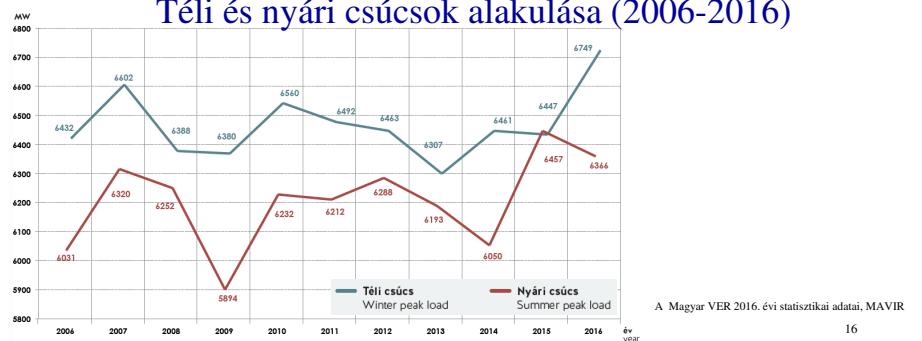
15

Nemzetközi kereskedelmi villamosenergia-forgalom (2016)



Összes export / Total export	-15 407,03 GWh	92%
Összes import / Total import	28 101,27 GWh	93%
Import-export szaldó / Import-export balance	12 694,24 GWh	93%

Téli és nyári csúcsok alakulása (2006-2016)



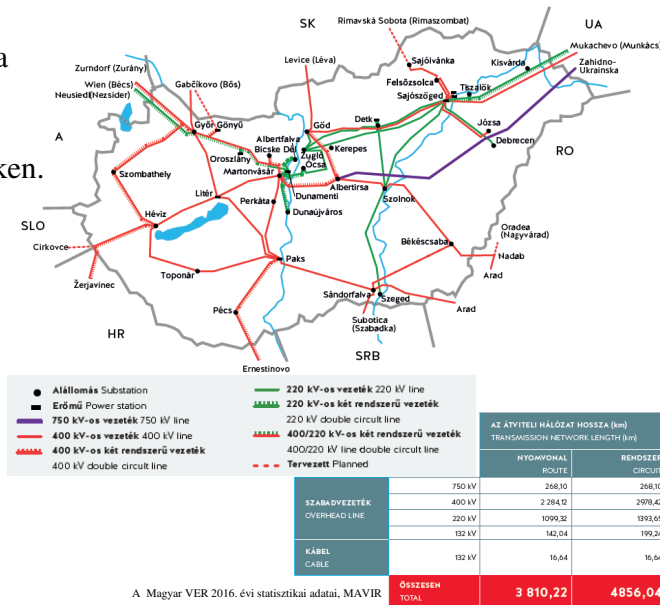
A Magyar VER 2016. évi statisztikai adatai, MAVIR

16

Szállítás és elosztás

- Villamos energia szállítása különböző feszültség szinteken. Ez alapján a következőket különböztetjük meg:

- alaphálózat
- főelosztó közép-feszültségű hálózat
- kisfeszültségű hálózat



Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

17

Szállítás és elosztás

- Alaphálózat:** a hálózat azon részei, amelyek
 - az alaperőműveknek az országon belüli vagy nemzetközi kooperációjára szolgálnak;
 - az alaperőműből vagy a nemzetközi csomópontokból a villamos energiának a főelosztó hálózatok felé való átvitelére szolgálnak.
 - A magyar VER-ben ide tartozik a 750 (nemzetközi kooperációs), a 400 és a 220 kV-os vezetékrendszer.
 - Az alaphálózaton kooperálnak a magyar VER nagyerőművei.

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

18

Szállítás és elosztás

- Főelosztó hálózat**
 - A 120 kV-os szabadvezetékes, a 120 és 35 kV-os kábeles hálózat tartozik ide.
 - Az MVER kisebb erőművei (<100 MW) és a nem közcélú erőművek kooperálnak ezen.
- Elosztó hálózat**
 - 20 kV-os szabadvezetékes, 10 és 20 kV-os kábeles hálózat .

közép-feszültségű hálózat

Szállítás és elosztás

- Kisfeszültségű hálózat:** a villamos energiának a lakossági fogyasztókhöz való továbbítására szolgál. Feszültség szintje 400 V.
-
- Állomás:** csatlakozások, leágazások. Itt csak a villamos energia áramlásának iránya változik meg.
 - Alállomás:** megváltozik a villamosenergia-továbbítás feszültség szintje is

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

19

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

20

Szállítás és elosztás

- A teherelosztás célja a rendszer stabil, követelményeket teljesítő működésének biztosítása és a mindenkor elérhető legkisebb önköltség elérése, figyelemmel a korlátozó és határfeltételekre.
- Többszintű rendszer:
 - országos szinten a MAVIR koordinálja
 - területi áramszolgáltatóknál: KDSZ (körzeti diszpécser szolgálatok)
 - elosztóhálózatokat ÜIK-ok (üzemirányító központok) koordinálják
- Teljes árampiaci liberalizáció: 2008. január 1.

Szállítás és elosztás

7.3A ÁTVITELI HÁLÓZAT NYOMVONALHOSSZA
ROUTE LENGTH OF TRANSMISSION NETWORK

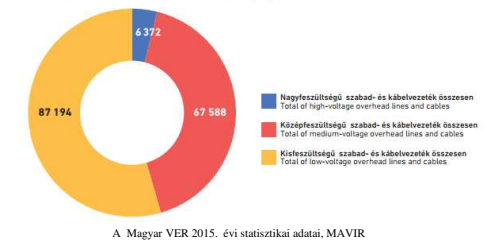
	2012	2013	2014	2015	2015 (2014=100%)
	km	km	km	km	%
Nagyszültségi szabadvezeték- és kábelvezeték összesen Total of high-voltage overhead lines and cables	3 804	3 810	3 810	3 810	100,0%
Nagyszültségi szabadvezeték összesen Total of high-voltage overhead lines	3 787	3 793	3 793	3 793	100,0%
ebből: 750 kV szabadvezeték of which: 750 kV overhead lines	268	268	268	268	100,0%
400 kV szabadvezeték 400 kV overhead lines	2 282	2 284	2 284	2 284	100,0%
270 kV szabadvezeték 270 kV overhead lines	1 097	1 099	1 099	1 099	100,0%
132 kV szabadvezeték 132 kV overhead lines	141	142	142	142	100,0%
Nagyszültségi kábelvezeték (132 kV) összesen Total of high-voltage cables (132 kV)	17	17	17	17	100,0%



7.4 ELOSZTÓHÁLÓZAT NYOMVONALHOSSZA
ROUTE LENGTH OF DISTRIBUTION NETWORK

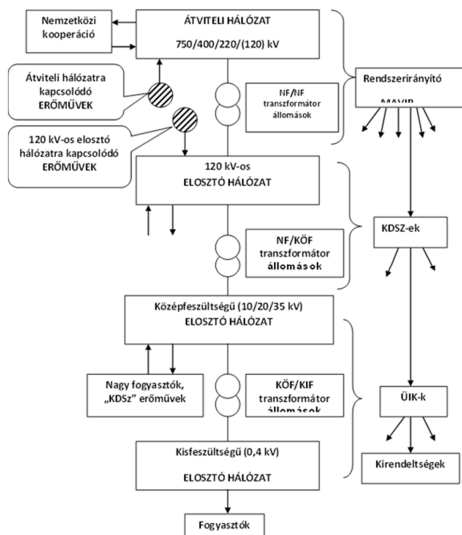
	2012	2013	2014	2015	2015 (2014=100%)
	km	km	km	km	%
Nagyszültségi szabadvezeték- és kábelvezeték összesen Total of high-voltage overhead lines and cables	6 261	6 304	6 304	6 372	100,8%
Középszültségi szabad- és kábelvezeték összesen Total of medium-voltage overhead lines and cables	67 178	67 280	67 420	67 588	100,2%
ebből: közepeszültségi szabadvezeték összesen of which: medium-voltage overhead lines	53 942	53 969	53 952	53 971	100,0%
középszültségi kábelvezeték összesen medium-voltage cables	13 216	13 311	13 468	13 617	101,1%
Kisfeszültségi szabad- és kábelvezeték összesen Total of low-voltage overhead lines and cables	86 800	86 579	86 901	87 194	100,3%
ebből: kisfeszültségi szabadvezeték of which: low-voltage overhead lines	64 411	64 300	64 453	64 527	100,1%
kisfeszültségi kábelvezeték low-voltage cables	22 389	22 249	22 449	22 667	101,0%
Szabad- és kábelvezeték összesen Total of overhead lines and cables	140 239	140 162	140 645	141 153	100,3%
ebből: szabadvezeték összesen of which: total of overhead lines	124 713	124 475	124 401	124 741	100,1%
kábelvezeték összesen total of cables	35 526	35 688	36 044	36 412	101,0%

ELOSZTÓHÁLÓZAT NYOMVONALHOSSZA, 2015 (km)
ROUTE LENGTH OF DISTRIBUTION NETWORK, 2015 (km)



Szállítás és elosztás

A hazai villamosenergia-rendszer és irányításának hierarchiája

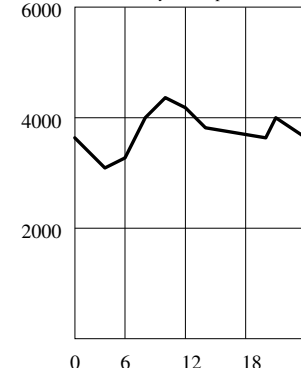


Forrás: https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0048_VIVEM265/ch04s09.html

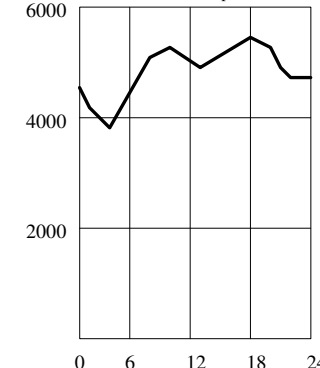
Villamosenergia-igények

- Energiatermelésnek és fogyasztásnak mindig egyensúlyban kell lennie
- Fogyasztói igények változását terhelési diagramokkal szemléltetik.

Nyári nap



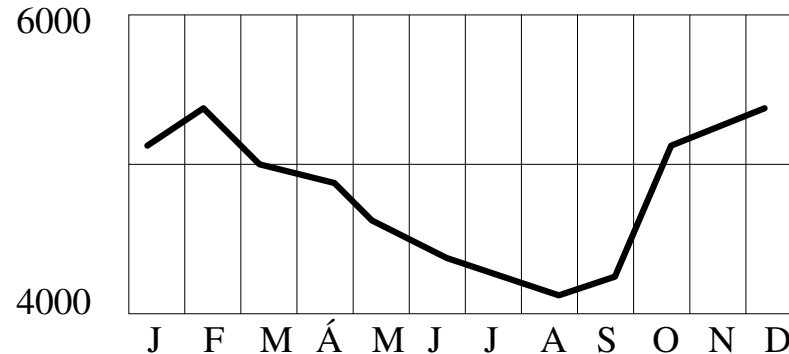
Téli nap



A VER terhelése nyáron és télen



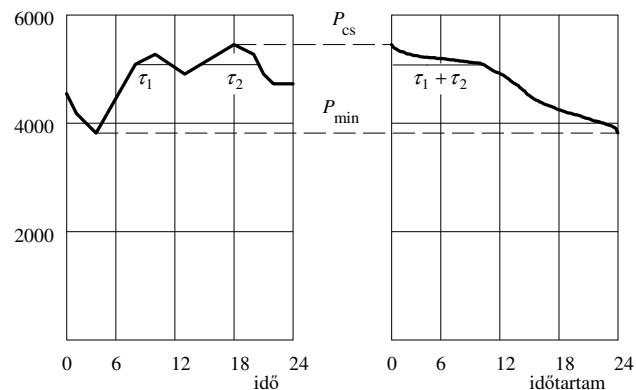
Villamosenergia-igények



A csúcsterhelések napi maximumai éves szinten

Villamosenergia-igények

- Teljesítmény-tartamdiagramok (röviden tartamdiagramok): a terhelés alakulása az időtartam (τ) függvényében



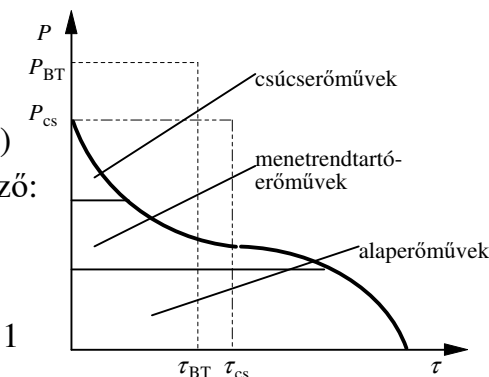
Tartamdiagram és szerkesztése terhelési diagram alapján

Villamosenergia-igények

- **Évi csúcskihasználási időtartam (τ_{cs}):** az az időtartam, ami alatt az évi villamos energiát (E) állandó P_{cs} csúcsterhelés mellett igényelnék:

$$E = P_{cs} * \tau_{cs}$$

- Hasonlóan értelmezhető a beépített teljesítményre (τ_{BT})
- **Évi csúcskihasználási tényező:** az évi csúcskihasználási időtartam (τ_{cs}) az év időtartamára vonatkoztatva:
 $v_{cs} = \tau_{cs} / \tau_a = \tau_{cs} / 8760 \text{ h} < 1$

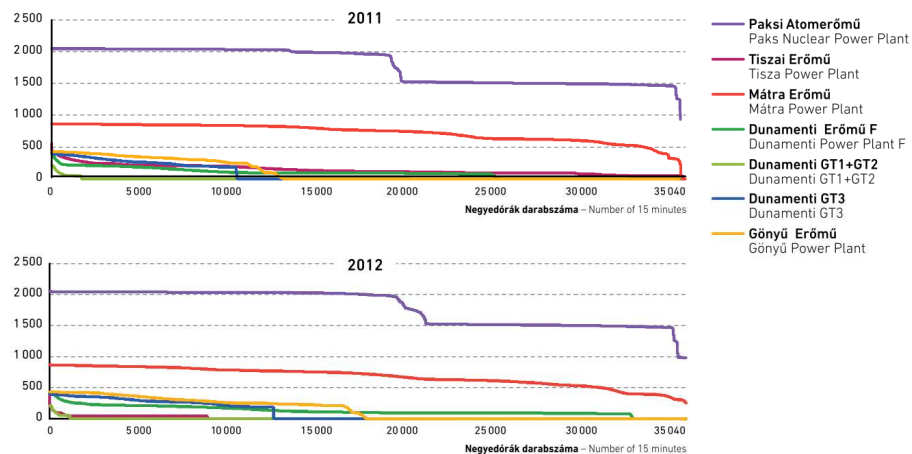


Eltérő funkciójú erőművek éves tartamdiagramja

- Az évi csúcskihasználási tényező más néven: *load-factor*

Villamosenergia-igények

300 MW BT-T MEGHALADÓ ERŐMŰVEK TARTAMDIAGRAMJA 2011, 2012 (MW)
DURATION CURVE OF POWER PLANTS (OVER 300 MW IC), 2011 AND 2012 (MW)



A MAGYAR VILLAMOSENERGIA-RENDSZER (VER)
2012. ÉVI STATISZTIKAI ADATAI-MAVIR

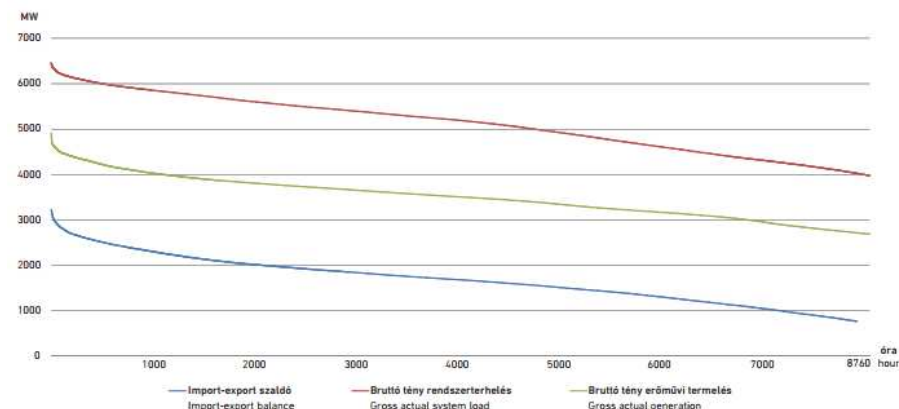
Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

29

Villamosenergia-igények

3.3 A VER ÉVES TARTAMDIAGRAMJA, 2015
ANNUAL DURATION CURVE OF THE HUNGARIAN ELECTRICITY SYSTEM, 2015



A Magyar VER 2015. évi statisztikai adatai, MAVIR

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

30

A teljesítménymérleg

- A termelés és az igények egyensúlyban tartásához szükség van az igények és a termelés várható értékeinek előrejelzésére
 - Igények előrejelzése: korábbi terhelési- és tartamdiagramokból statisztikai módszerrel (1-2 %-os hibával működik)
 - Termelés előrejelzése: a beépített teljesítmény ismert, a különböző hiányokat kell előre megbecsülni

A teljesítménymérleg

- Állandó jellegű hiányok (ÁH) ill. többletek (min. 12 hónapig állandó):
 - A tartósan leállított berendezések teljesítménye
 - Állandó jellegű gőzhiány
 - Hőszolgáltatás miatti tartós hiány
 - Hűtési elégtelenségek miatti tartós teljesítményhiány
 - Tartós vízhiány miatti teljesítmény-csökkenés (vízerőművek)
 - Tüzelőanyag minőségének a tervezettől való eltérése
 - Tartósan fenntartható túlterhelés miatti teljesítőképesség növekedés
- Változó jellegű teljesítőképesség hiányok és többletek (VH):
 - hőszolgáltatással kapcsolatban következik be, vagy
 - időjárás okok váltják ki.

A teljesítménymérleg

- Rendelkezésre álló *beépített* teljesítőképesség:

$$P_{RBT} = P_{BT} - P_{\dot{A}H}$$

- Rendelkezésre álló teljesítőképesség

$$P_{RT} = P_{RBT} - P_{VH}$$

- Igénybe vehető teljesítőképesség

$$P_{IT} = P_{RT} - P_{TMK}$$

ahol P_{BT} a beépített teljesítőképesség

$P_{\dot{A}H}$ az állandó hiány

P_{VH} a változó hiány

P_{TMK} a tervszerű megelőző karbantartáson lévő teljesítmény

A teljesítménymérleg

- Üzembiztosan igénybe vehető teljesítőképesség

$$P_{\dot{U}IT} = P_{IT} - P_{\dot{U}T}$$

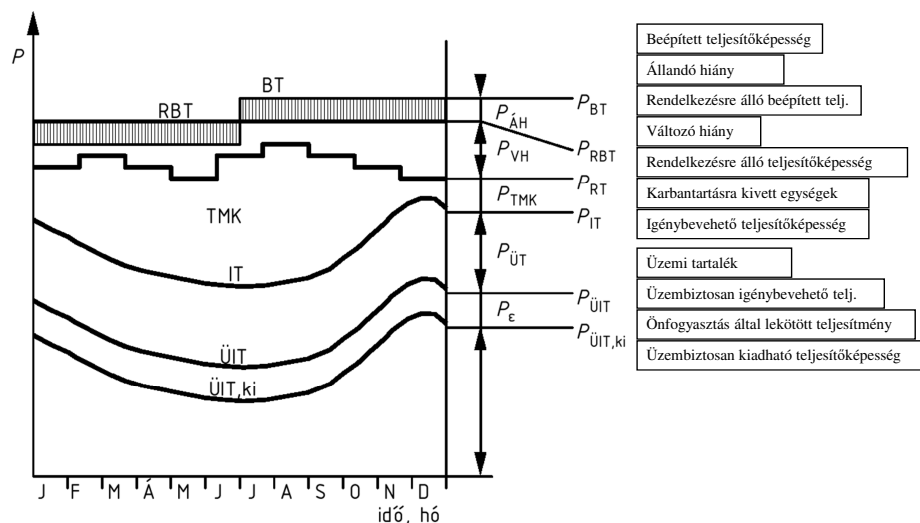
- Üzembiztosan kiadható teljesítőképesség

$$P_{\dot{U}IT,ki} = P_{RBT} - P_{\epsilon}$$

ahol $P_{\dot{U}T}$ az üzemi tartalék

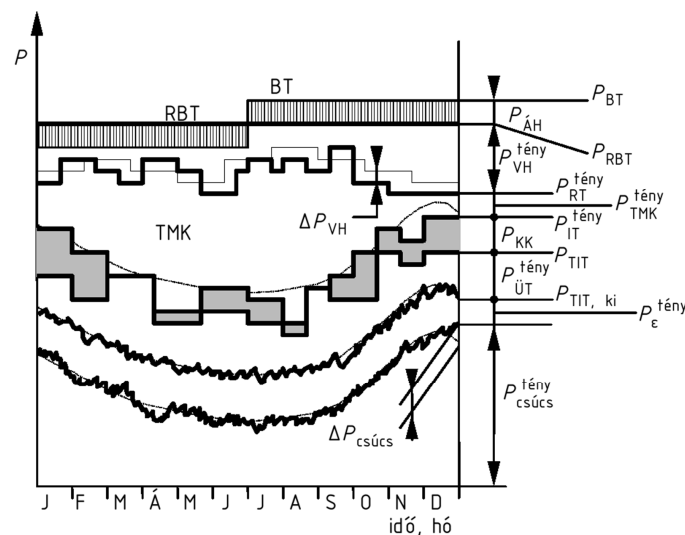
P_{ϵ} az önfogyasztás

A teljesítménymérleg



1-10. ábra. Az erőműrendszer előtervezett teljesítménymérlegének alakulása

A teljesítménymérleg



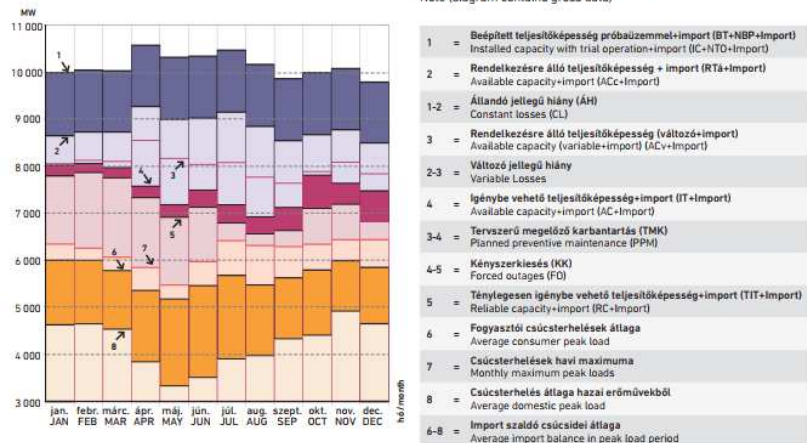
1-11. ábra. Az erőműrendszer tényleges teljesítménymérlegének alakulása

A villamosenergia-rendszer teljesítőképessége 2015-ben

3.8 A VER TELJESÍTŐKÉPESSÉG ADATAI CAPACITY DATA OF HUNGARIAN ELECTRICITY SYSTEM

3.8A A VER ÁTLAGOS HAVI BRUTTÓ ADATAI, 2015 MONTHLY AVERAGE DATA OF HUNGARIAN ELECTRICITY SYSTEM, 2015

Magyarázat (az ábra bruttó adatokat tartalmaz):
Note (diagram contains gross data)



Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

A Magyar VER 2015. évi statisztikai adatai, MAVIR 37

Tartalékok

- A nagy, összekapcsolt hálózatokban résztvevő társaságok közös érdek alapján határozzák meg a minimális tartalékokat.
- Ahol a megújuló energiák aránya magas, ezek alacsony rendelkezésre állása miatt nagyobb tartalékkapacitásra van szükség.

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

38

Tartalékok

- Lehetőleg mindig fenn kell tartani a termelés és az igények közti egyensúlyt.
- Ha az egyenlőség nem áll fenn, a hálózati frekvencia változik.
- Ennek elkerüléséhez frekvenciaszabályozókat építenek a villamosenergia-rendszerbe, a szabályozáshoz azonban tartalékokra van szükség.

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

39

Tartalékok

- Tartalék:
 - beépített teljesítőképesség növelése vagy
 - fogyasztói korlátozás önkéntes alapon (ritkán alkalmazzák)
- Fajtái:
 - **Hideg tartalék:** üzemkész, de álló helyzetű turbógépcsoport
 - **Meleg tartalék:** a turbógépcsoport már szinkronban jár a hálózattal, de teljesítménye még nem érte el teljesítőképességének maximumát.

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

40

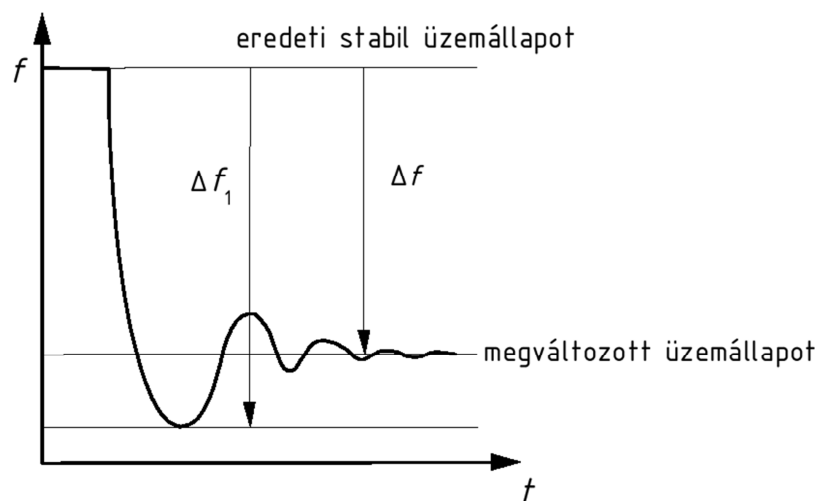
Tartalékok – elérhetőség szerint

- **Azonnal igénybe vehető tartalék:**
 - 1-10 másodpercen belül rendelkezésre állnak
 - Forgó tartalékok, automatikus aktiválással
- **Gyorsan igénybe vehető tartalék:**
 - 1-10 percen belül állnak rendelkezésre
 - Általában meleg tartalékok, de lehet álló gázturbinás vagy vízerőművi egység is.
- **Lassan igénybe vehető tartalék:**
 - 1-10 órán belül állnak rendelkezésre
 - Hideg tartalékok hagyományos erőművekben (lassan indítható, álló blokkok)

Tartalékok – funkció szerint

- **primer szabályozási tartalék:**
 - a rendszer egyensúlyát (frekvenciáját) stabilizálja egy megváltozott üzemállapotban
- **szekunder szabályozási tartalék:**
 - a rendszer frekvenciáját, vagy az együttműködő rendszerek csereteljesítményét állítja vissza az eredeti értékre
- **tercier szabályozási tartalék:**
 - a rendszer legkisebb energiaköltségű munkapontját állítja be

Tartalékok



A frekvencia időbeni változása hirtelen kiesés után a **primer szabályozás** hatására

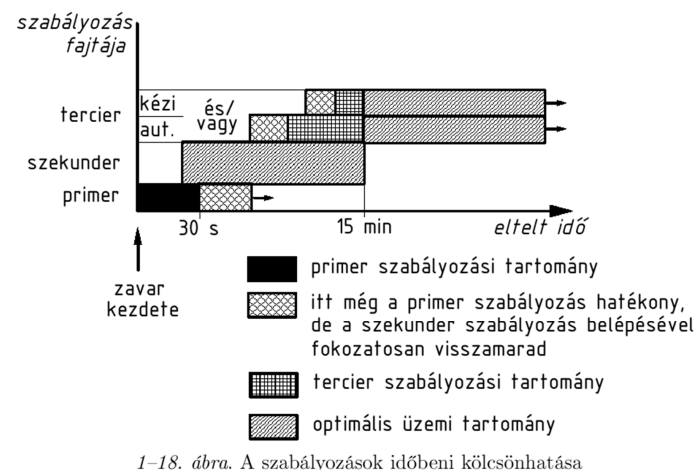
Tartalékok

- **A szekunder szabályozás feladata**, hogy a maradó Δf frekvencia-eltérést megszüntetve visszaállítsa az 50 Hz-es frekvenciát
- Ez - ellentétben a primer szabályozással - minden résztvevőnek egyéni feladata
- Szekunder szabályozás: a kiesett P_A teljesítményt pótolva visszaállítani a frekvenciát és a csereteljesítmény értékét az eredeti értékre.
- Többnyire forgó, vagy gyorsan aktivizálható álló tartalékok.

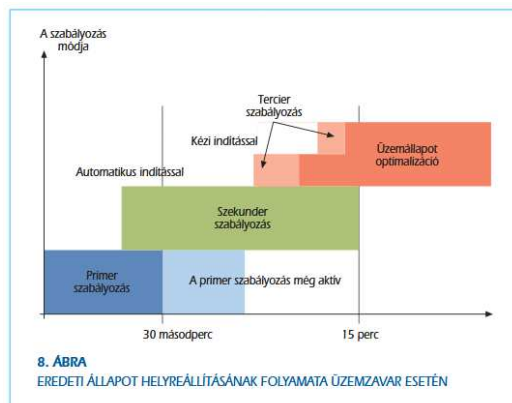
Tartalékok

- **Tercier szabályozás:** a primer és a szekunder szabályozásban résztvevő egységek munkapontját hozza (automatikusan vagy kézi beavatkozással) a legkisebb költséget eredményező helyzetbe.
- **Cél:** a megfelelő szekunder tartalék kielégítő módon és gazdaságilag optimálisan álljon rendelkezésre. Emiatt a tercier szabályozás alapvetően teherelosztási feladat. Pl.:
 - erőművi egységek ki/be kapcsolása
 - rendszerszintű fogyasztók ki/be kapcsolása
 - fogyasztói csoportok terhelésének vezérlése

Tartalékok



Tartalékok



Kategóriák:

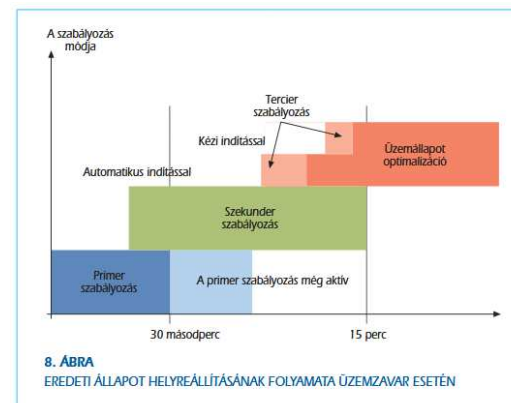
- **Másodperces tartalék** (amely néhány másodpercen belül teljes mértékben rendelkezésre áll, de ugyanakkor csak korlátozott ideig áll rendelkezésre).
- **Perces tartalék** (amely néhány percen belül rendelkezésre áll, de működtetése rendkívül drága, ezért rövid időn belül célszerű kiváltani).
- **Órás tartalék** (amely hidegen álló, de üzemkész berendezések indításával biztosítható és a belépő egység kiválasztása a rendszerszintű optimalizáció figyelembe vételével történhet).
- **Napos tartalék** (amely hidegen álló nem üzemkész berendezések indításával biztosítható, a belépő egység kiválasztása a rendszerszintű optimalizáció figyelembe vételével történhet).
- **Hetes tartalék** (amely karbantartáson álló nem üzemkész berendezések karbantartásának lerövidítésével, felüggesztésével biztosítható és a belépő egység kiválasztása a rendszerszintű optimalizáció figyelembe vételével történhet).

Az utóbbi három kategóriánál pótlólagos importforrások, vagy exportszállítás csökkentések reális lehetőségét is feltételezve. (Az Egyesült Államokban folyamatos, gyors és lassú kategóriákat is megkülönböztetnek.)

Üzemzavar során az első pillanatban az üzemzavar miatti frekvencia-eltérés kiegyenlítése nem csak az üzemzavarral érintett rendszerben, hanem minden összekapcsolt, együttműködő rendszerben szabályozási folyamatokat indít el, azaz a primer szabályozást az együttműködésben résztvevők egymás között megosztják.

Forrás: Gerse K., <http://mvm.hu/download/energiaforras/MVM-Kozlemenyek-2002.pdf>

Tartalékok



Az UCTE vizsgálatai alapján a kontinentális együttműködő villamosenergia-rendszerben összesen **3000MW-nyi primer tartalék szükséges**, amelyből a magyar villamosenergia-rendszernek **+50 MW-nyi** bármikor igénybe vehető ilyen tartalékot kell biztosítani.

Primer szabályozásként csak a másodperces tartalék biztosításra alkalmas megoldások, csak üzemben lévő, a frekvenciaeltérés értékét érzékelni képes (primer szabályozóval ellátott) erőművi berendezések, vagy szerződésben biztosított automatikus (frekvenciaeltérés-függő) fogyasztói lekapcsolások jöhetnek szóba.

A szekunder szabályozásként az UCTE előírás szerint

$$P_{sz} = \sqrt{10 \cdot P_{csokcs} + 150} - 150 \quad (\text{MW})$$

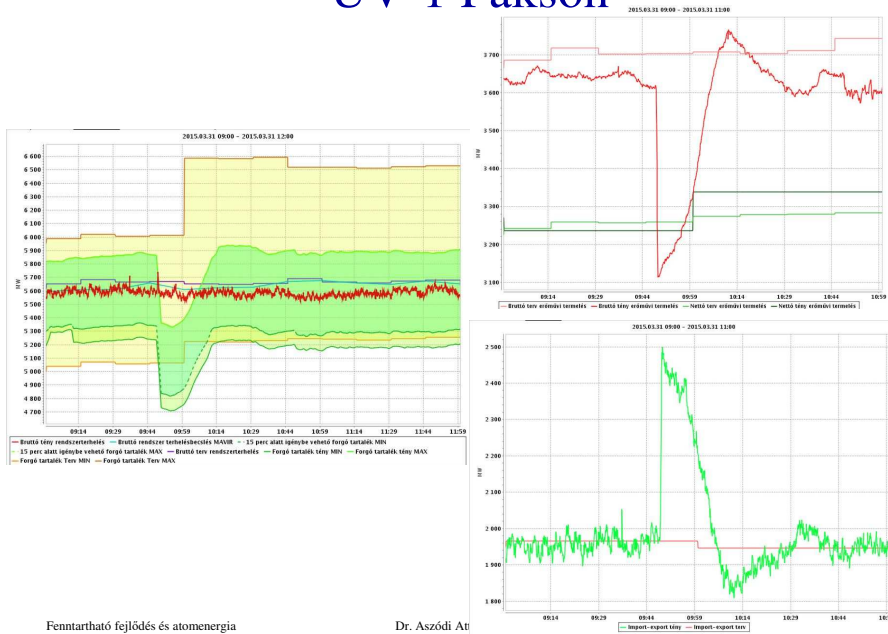
képletből kiadódó (~115 MW), vagy a legnagyobb üzemben lévő blokk maximális teljesítményével (500 MW) azonos érték közül a nagyobbat kell biztosítani.

A magyar rendszerre az utóbbi mértékadó, figyelembe véve a Paksi Atomerőmű egységtelejlesztését.

A szekunder szabályozás céljára részben az üzemben lévő berendezések, részben stand-by állapotú, gyorsan felterhelhető, nyitliclusú gázturbinák, illetve szerződésben biztosított automatikus, (rendszerirányító által indított), fogyasztói lekapcsolások (azaz másodperces, vagy perces tartalékok) jöhetnek szóba.

Forrás: Gerse K., <http://mvm.hu/download/energiaforras/MVM-Kozlemenyek-2002.pdf>

ÜV-1 Pakson



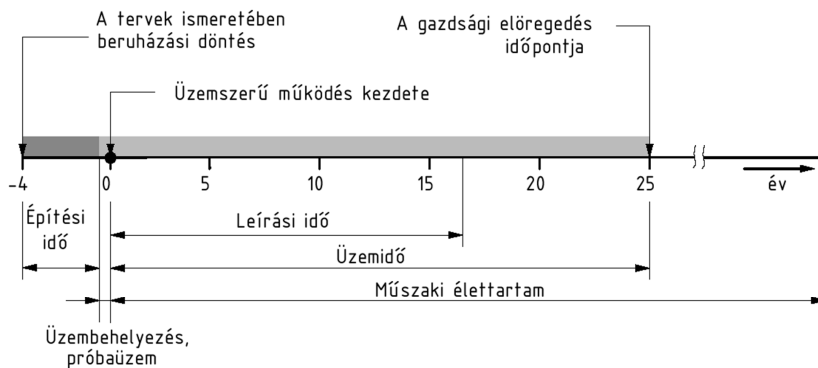
Az erőművi villamosenergia-termelés költségei

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

50

Az erőművek költségei

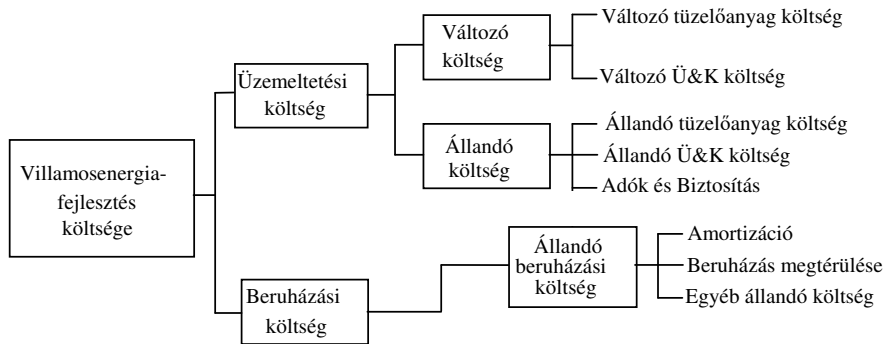


2-1. ábra. Egy beruházás élettartama

Az erőművek költségei

- VER bővítésekor (új erőmű v. régi bővítése)
 - beruházási költség (tőke befektetési költség, Ft/kW): az erőmű építésének egyszeri költségét jelenti
 - energiafejlesztési költség (Ft/kWh): magában foglalja a villamosenergia-termelés költségét
 - üzemanyag költség
 - működtetési és karbantartási költség (Ü&K)
 - Költségek másféle felosztása: állandó és változó költség

Az erőművek költségei



A villamosenergia-termelés költségnevei

Az erőművek költségei

- **Pl.: atomerőmű**
 - beruházási költség nagyon magas
 - üzemanyag költség alacsony
 - **Szénhidrogén tüzelésű erőmű**
 - beruházási költség alacsony
 - üzemanyag költség magas
 - **Szélerőmű**
 - beruházási költség nem olyan magas
 - nincs üzemanyagköltség (de van karbantartási költség)
- A költségek összehasonlítása több módon lehetséges. Abszolút és fajlagos beruházási költségek, finanszírozás költségei, üzemanyag, üzemeltetés, karbantartás költségei; LCOE.

Az erőművek költségei

- A villamos energia egységköltsége az éves költségek és a kiadott villamos energia mennyiségének hányadosa:

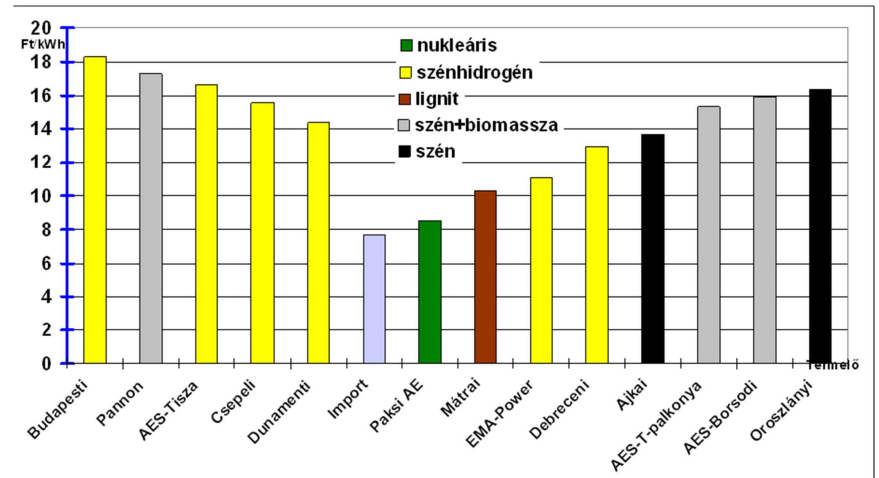
$$k = \frac{C}{E} = \frac{C_a}{E} + \frac{C_v}{E} \cong \frac{C_a}{E} + \frac{C_u}{E} = k_a + k_u = \frac{\alpha \cdot a \cdot P_{BT}}{E} + \frac{p_Q}{\eta_{KE}}, \text{ ahol}$$

- $a = B_0 / P_{BT}$ a fajlagos beruházási költség,
- $p_Q = p_u / H_u$ a tüzelőanyag hőára,
- $E = P_{cs} \cdot \tau_{cs}$ az éves szinten kiadott villamos energia,
- $\frac{1}{\eta_{KE}}$ az erőmű évi átlagos hatásfoka,

$$\alpha_1 = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+p)^i} \right)^{-1} = \frac{p}{1 - (1+p)^{-n}} \text{ az évi kamatos leírás tényező (annuitás).}$$

A magyar villamosenergia-rendszer

Hazai termelői áramárak 2004-ben



Adatok forrása: www.eh.gov.hu

Fajlagos beruházási költség

Konkrét típustól, építési feltételektől, országtól, időponttól függő érték

Table 3.1: Summary statistics for different generating technologies

Technology	Number of plants	Net capacity ¹ (MWe)				Overnight cost ² (USD/kW)			
		Min	Mean	Median	Max	Min	Mean	Median	Max
Natural gas – CCGT	13	350	551	475	900	627	1 021	1 014	1 289
Natural gas – OCGT	4	50	274	240	565	500	708	699	933
Coal	14	605	1 131	772	4 693	813	2 080	2 264	3 067
Nuclear	11	535	1 434	1 300	3 300	1 807	4 249	4 896	6 215
Solar PV – residential	12	0.003	0.007	0.005	0.02	1 867	2 379	2 297	3 366
Solar PV – commercial	14	0.05	0.34	0.22	1.0	728	1 583	1 696	1 977
Solar PV – large	12	1	19.3	2.5	200	937	1 555	1 436	2 563
Solar thermal (CSP)	4	50	135	146	200	3 571	5 964	6 072	8 142
Onshore wind	21	2	38	20	200	1 200	1 911	1 804	2 999
Offshore wind	12	2	275	223	833	3 703	4 985	4 998	5 933
Hydro – small	12	0.4	3.1	2	10	1 369	5 127	5 281	9 400
Hydro – large	16	11	1 093	50	13 050	598	3 492	2 493	8 687
Geothermal	6	6.8	62	27	250	1 493	4 898	5 823	6 625
Biomass and biogas	11	0.2	154	10	900	587	4 447	4 060	8 667
CHP (all types)	19	0.2	5.3	1.1	62	926	4 526	2 926	15 988

1. Net capacity may refer to the unit capacity or to the combined capacity of multiple units on the same site.
2. Overnight cost includes pre-construction (owner's), construction (engineering, procurement and construction) and contingency costs, but not interest during construction (IDC).

Project Costs of Generating Electricity, 2015 Edition, IEA, NEA

Villamosenergia-egységköltség

- LCOE - levelised cost of electricity [Ft/kWh, €/MWh, stb.]
 - Az erőmű teljes életciklusa alatt felmerült költségek bázisán alkalmas az egységnyi villamos energia termelési költségeinek összevetésére.
 - Értéke a finanszírozási és jogi környezet jellemzőitől is függ.
- Kulcsparaméterek:
 - Beruházási költségek és időtartam
 - annuitás – 5%? 7%? 10%?
 - üzemanyag hőára
 - üzemidő – pl.:
 - szélerőművek, PV telepek: 25 év
 - gázerőművek: 30 év
 - atomerőművek: 60 év
 - kapacitásfaktor
 - a rendelkezésre álló idő 25%-ában vagy 90%-ában termel névleges teljesítménnyel?
 - építési idő – 1 év? 5 év? 10 év?
- Beépített (internalizált) külső költségek

Villamosenergia-egységköltség

Figure ES.1: LCOE ranges for baseload technologies (at each discount rate)

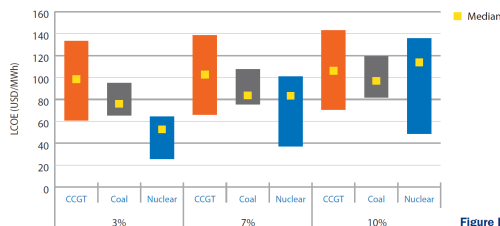
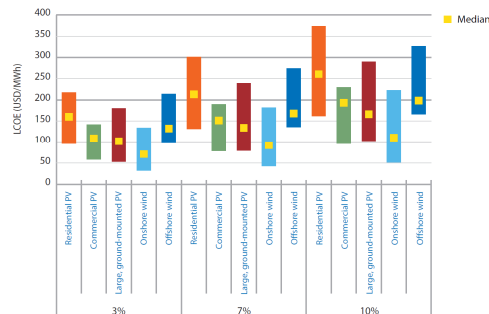


Figure ES.2: LCOE ranges for solar PV and wind technologies (at each discount rate)



Project Costs of Generating Electricity, 2015 Edition, IEA, NEA

Villamosenergia-egységköltség

Figure 4.6: Levelised cost of electricity – Germany

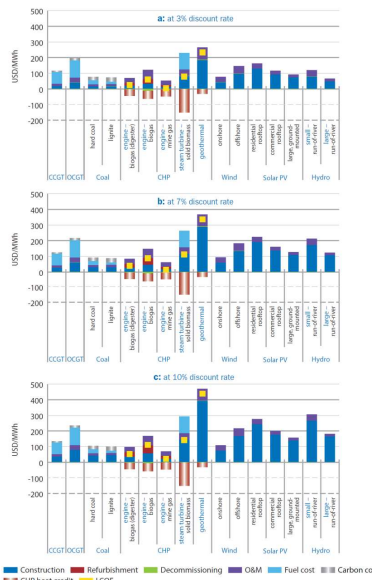
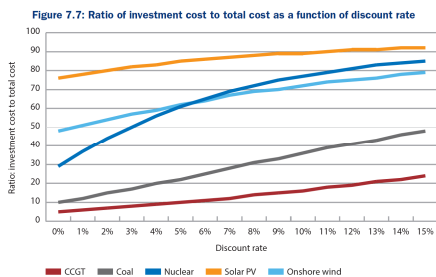
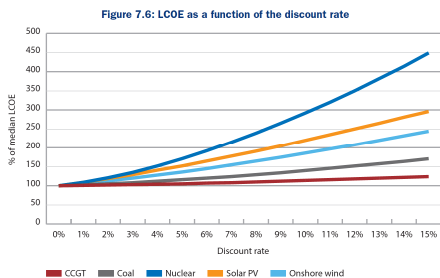
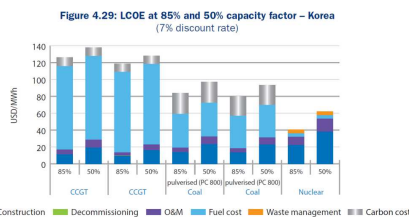


Figure 4.21: Levelised cost of electricity – China

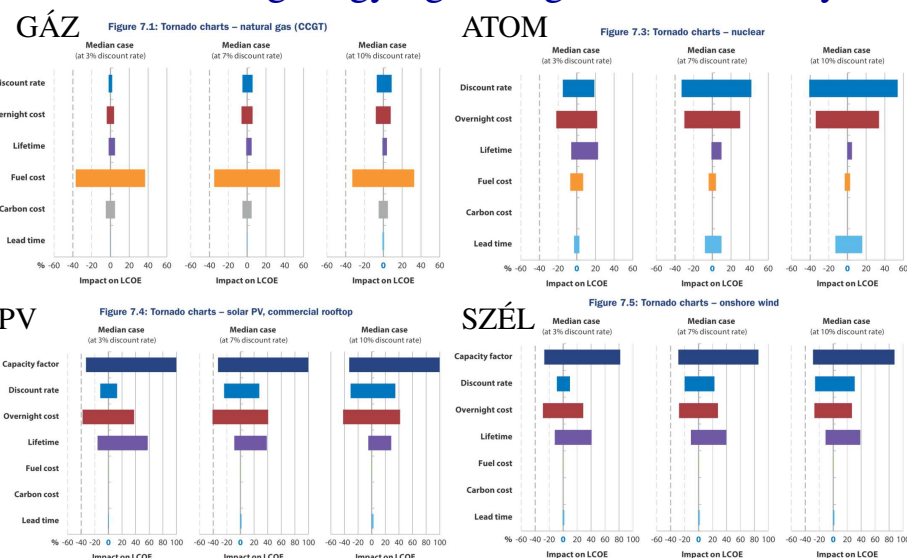


Villamosenergia-egységköltség



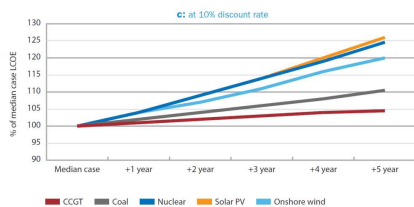
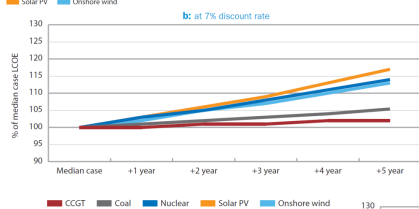
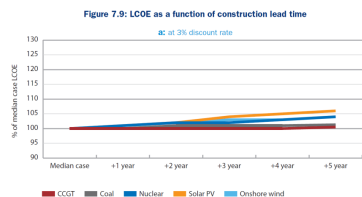
Project Costs of Generating Electricity, 2015 Edition, IEA, NEA

Villamosenergia-egységköltség – mire érzékeny?



Project Costs of Generating Electricity, 2015 Edition, IEA, NEA

Villamosenergia-egységköltség



Project Costs of Generating Electricity, 2015 Edition, IEA, NEA

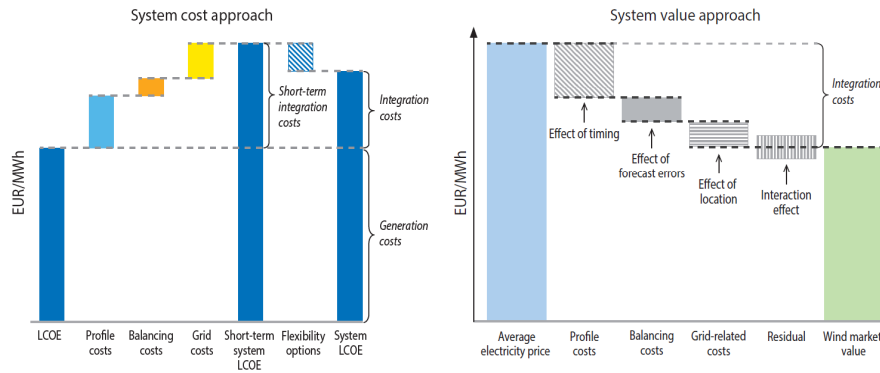
Villamosenergia-egységköltség – mi maradt ki?

$$k = \frac{C_{\text{ö}}}{E} = k_a + k_v + k_{\text{ex}} = \frac{\alpha \cdot a P_{\text{BT}}}{E} + \frac{PQ}{\eta} + k_{\text{ex}}, \quad \text{Ft/kWh}$$

- k_{ex} : külső (externális) költség, Ft/kWh
 - **Már internalizált:**
 - CO₂ ár
 - Hulladékkezelés (lásd: KNPA)
- **Rendszerköltség**
 - adott technológiát építünk be a villamosenergia-rendszerbe
 - különböző módon viselkedő termelési technológiák egymásra hatásának költsége
 - hogyan változik meg a villamos energia ára
 - egyes költségek emelkednek, pl.: kiegyenlítés, tartalékok. csökkenő kihasználás
 - egyes költségek csökkennek, pl.: üzemanyagköltség

Externáliák – rendszerköltség

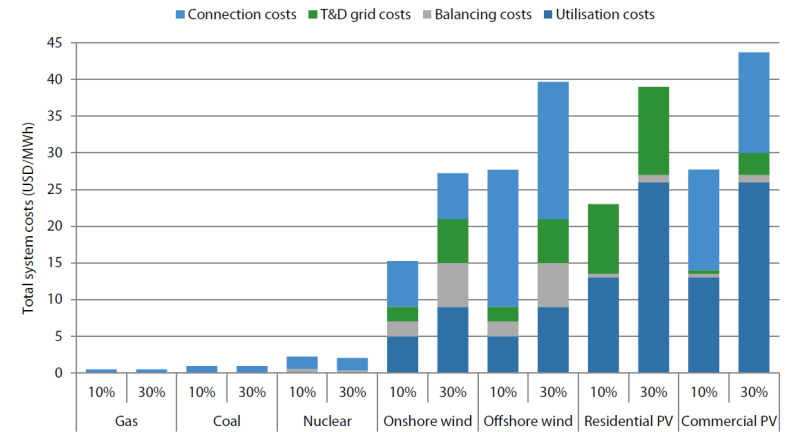
Figure 10.1: Illustration of system costs, system value and system cost approaches



Project Costs of Generating Electricity, 2015 Edition, IEA, NEA

Externáliák – rendszerköltség

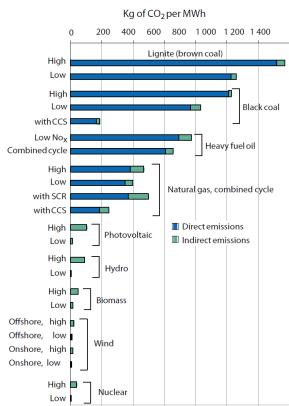
Figure ES.3: Grid-level system costs of selected generation technologies for shares of 10% and 30% of VRE generation



THE FULL COSTS OF ELECTRICITY PROVISION, NEA No. 7298, © OECD 2018

Externáliák – légköri kibocsátások, klímaváltozás

Figure 4.3: Direct and indirect CO₂ emissions of different power generation technologies



CCS: carbon capture and storage; NGCC: natural gas combined-cycle; SCR: selective catalytic reduction. Source: IPCC, 2007b.

AFOLU: Agriculture, Forestry and Other Land Use
BECCS: Bioenergy with Carbon Capture and Storage

Pathway classification	P1		P2		P3		P4		Interquartile range	
	No or low overshoot	No or low overshoot	No or low overshoot	No or low overshoot	High overshoot	High overshoot	No or low overshoot	No or low overshoot		
CO ₂ emission change in 2030 (% ref to 2010)	-58	-47	-41	4						(-59, 46)
- in 2050 (% ref to 2010)	-93	-91	-91	-97						(-104, 91)
Kyoto-GHG emissions* in 2030 (% ref to 2010)	-50	-49	-35	-2						(-55, 38)
- in 2050 (% ref to 2010)	-82	-89	-78	-80						(-93, 91)
Final energy demand** in 2030 (% ref to 2010)	-15	-5	17	39						(-12, 7)
- in 2050 (% ref to 2010)	-32	2	21	44						(-12, 22)
Renewable share in electricity in 2030 (%)	60	58	48	25						(47, 65)
- in 2050 (%)	77	81	63	70						(69, 87)
Primary energy from coal in 2030 (% ref to 2010)	-78	-61	-75	-59						(-78, -59)
- in 2050 (% ref to 2010)	-97	-77	-73	-97						(-95, -74)
from oil in 2030 (% ref to 2010)	-37	-13	-3	86						(-34, 3)
- in 2050 (% ref to 2010)	-67	-50	-41	-32						(-78, 31)
from gas in 2030 (% ref to 2010)	-35	-20	33	37						(-26, 21)
- in 2050 (% ref to 2010)	-74	-53	31	-48						(-56, 6)
from nuclear in 2030 (% ref to 2010)	59	83	98	106						(44, 102)
- in 2050 (% ref to 2010)	150	98	501	468						(91, 139)
from non-biomass renewables in 2030 (% ref to 2010)	-16	49	121	418						(123, 261)
- in 2050 (% ref to 2010)	430	470	315	110						(243, 438)
from gas in 2030 (% ref to 2010)	832	1327	878	1137						(975, 1300)
Cumulative CCS until 2100 (GtCO ₂)	0	348	687	1218						(550, 1017)
- of which BECCS (GtCO ₂)	0	151	414	1191						(364, 662)
Land area of bioenergy crops in 2050 (million hectare)	22	93	283	724						(151, 320)
Agricultural CO ₂ emissions in 2030 (% ref to 2010)	-24	-48	1	14						(-50, 11)
- in 2050 (% ref to 2010)	-33	-49	-23	2						(-46, 23)
Agricultural NO _x emissions in 2030 (% ref to 2010)	5	-26	15	3						(-21, 4)
- in 2050 (% ref to 2010)	6	-26	0	39						(-26, 1)

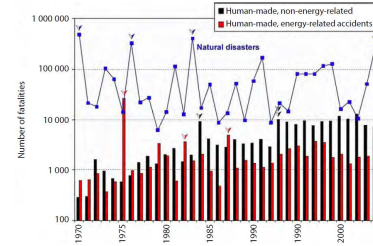
NOTE: Indicators have been selected to show global trends identified by the Chapter 2 assessment. National and sectoral characteristics can differ substantially from the global trends shown above. * Kyoto-gas emissions are based on SAR GWP 100. ** Changes in energy demand are associated with improvements in energy efficiency and behaviour change.

IPCC Special Report 2018: 1,5 °C

The full cost of electricity provision, 2018, OECD NEA

Externáliák – közvetlen halálesetek

Figure 6.1: Number of fatalities due to natural disasters and human-made accidents



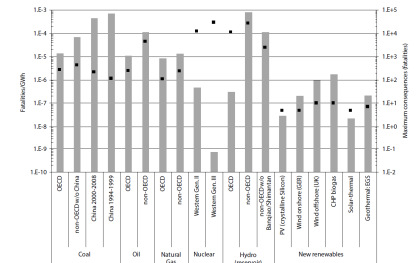
Source: Burgherr et al., 2008c.

Table 6.1: Summary of accidents with more than five fatalities in the ENSAD database (1970-2008)

Energy chain	OECD		EU27		Non-OECD	
	Accidents	Fatalities	Accidents	Fatalities	Accidents	Fatalities
Coal	87	2 259	45	989	162	5 708
Oil	187	3 495	65	1 243	358	19 516
Natural gas	109	1 258	37	367	78	1 556
Liquefied petroleum gas	68	1 854	20	671	70	2 760
Hydroelectric	1	14	1	116	9 ^a	3 961
Nuclear	-	-	-	-	12	26 108
Biofuel	-	-	-	-	-	31 ^b
Biogas	-	-	-	-	2	18
Geothermal	-	-	-	-	1	21
Wind ^c	54	60	24	24	6	6

a. Coal: first five non-OECD total; second five non-OECD without China; third five China 1994-1999; fourth five China 2000-2008. b. Hydro: first five non-OECD without China; second five China. c. Nuclear: only immediate fatalities. d. Wind: only small accidents. Note: Quantitative estimates of ongoing fatalities from the major nuclear accidents are provided in the user section. Source: Burgherr and Hirschberg, 2014.

Figure 6.2: Severe accident fatality rates and maximum consequences (black points)

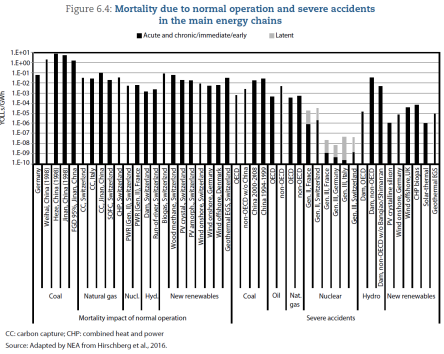
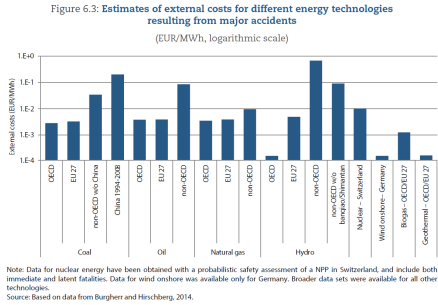


Note: Data are based only on historical experience in the period from 1970 and 2008. For nuclear, results are based on a PSA assessment. While for new renewables are a combination of historical data, expert judgement and modelling. Source: Adapted from Hirschberg et al., 2016.

1. Better reporting may also have contributed to this trend.

The full cost of electricity provision, 2018, OECD NEA

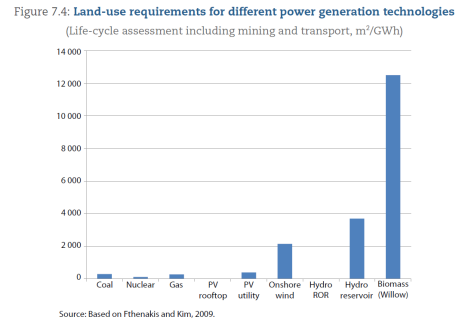
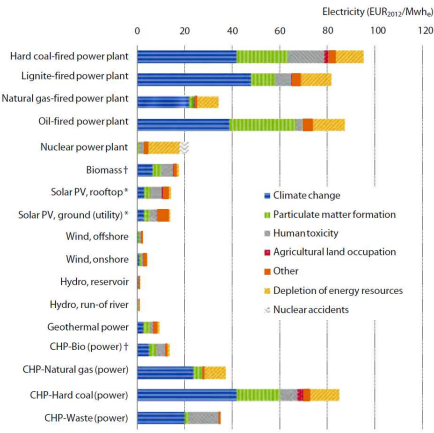
Externáliák – közvetlen halálesetek



The full cost of electricity provision, 2018, OECD NEA

Externáliák – földhasználat, erőforrások kimerítése

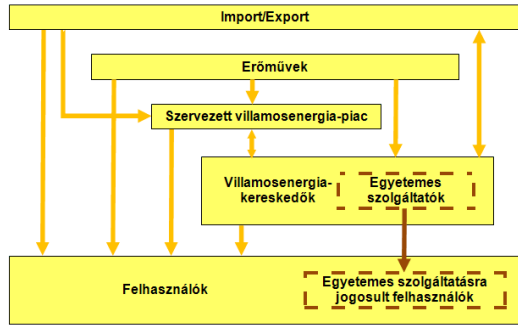
Figure 7.3: External costs including resource depletion for different electricity generation technologies (Weighted average of EU countries, EUR/MWh)



The full cost of electricity provision, 2018, OECD NEA

Árampiac Magyarországon

- Teljes árampiaci liberalizáció 2008. január 1-től
- HUPX villamosenergia-tőzsde 2010. július 20-tól (akár másnapi szállításra vonatkozó kötések áramtermelők és villamosenergia-kereskedők között)
- Kivétel a kapcsolatosan termelt illetve a megújuló forrásokból előállított áram. Ezeket a MAVIR köteles a Villamos Energia Törvényben (VET) előírt áron átvenni. A többletköltségeket szétosztják a fogyasztókra.
- Egyetemes szolgáltatásra jogosult fogyasztók: megkülönböztetett csoport, tipikusan a lakosság – piaci hatásoktól bizonyos mértékig védettek. Lehetőség a szabályozott árú áram vételére



A fogyasztói ár

- A villamos energia fogyasztói árának komponensei és azok részesedése**
- Előállítási költség: ~35-50%
 - Villamos energia szállítási és elosztási költségek (rendszerhasználat): ~45-55%
 - Kiskereskedői költségek, árrés: ~6-10%

A villamos energia termelési mód alapvetően csak az előállítási költséget befolyásolja.

Főbb ellenőrző kérdések

1. Sorolja fel a villamosenergia-rendszer alkotóelemeit és feladatát!
2. Ismertesse az erőművek különböző csoportosítási lehetőségeit (közcélu és ipari, üzemyanyag szerint, kapcsolat szerint, kihasználás szerint)
3. Ismertesse Magyarország főbb villamosenergia-termelő erőműveit!
4. Ismertesse a magyar VER főbb termelési és fogyasztási adatait (összes felhasználás, bruttó fogyasztás, nettó termelés, import) és azok tendenciáit az utóbbi tíz évben!

Főbb ellenőrző kérdések

11. Jellemezze a magyar villamosenergia-termelést energiahordozó-felhasználása alapján!
12. Ismertesse a magyar szállító és elosztó hálózatot és részeit: alaphálózat!
13. Ismertesse a magyar szállító és elosztó hálózatot és részeit: főelosztó és elosztó hálózat!
14. Ismertesse a magyar szállító és elosztó hálózatot és részeit: kifizetésű hálózat, állomások, alállomások!
15. Mi a teherelosztás!
16. Ismertesse a villamosenergia-igények jellemző változásait, napi, évszakos, évi szinten!
17. Készítsen tartamdiagramot egy napi terhelési diagram alapján!
18. Évi csúcskihasználási időtartam, csúcskihasználási tényező
19. Mi a teljesítménymérleg? Milyen paraméterek előrejelzésére van szükség az egyensúlyhoz?
20. Állandó jellegű hiányok, változó jellegű hiányok ismertetése

Főbb ellenőrző kérdések

21. Igénybe vehető, üzembiztosan igény bevezető, üzembiztosan kiadható teljesítő képesség ismertetése
22. A teljesítménymérleg időbeli alakulása (grafikon)
23. Tartalékok szerepe, fajtái
24. Azonnal, gyorsan, lassan igénybe vehető tartalékok
25. Primer szabályozási tartalékok
26. Szekunder szabályozási tartalékok
27. Tercier szabályozási tartalékok
28. Villamos energia előállításának költségei
29. Állandó és változó költségek
30. Egyes technológiák költség oldali összehasonlítása
31. LCOE és számítási módszertana
32. Externális és internalizált költségek
33. Árampiac