

A szuperkritikus CO₂ erőművi alkalmazásaiban használt, nagy forgássebességű generátorok jövőbeli szerkezeti anyagai

Future Structural Materials of High Speed Generators Used in Supercritical CO₂ Based Power Plant Applications

Nagy András,¹ Jankovics István,² Máté Márton³

¹ Dunaújvárosi Egyetem, Magyarország, nagyandras@uniduna.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország, ijankovics@vrht.bme.hu

³ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Románia, mmate@ms.sapientia.ro

Abstract

The aim of this paper is to present the applicability of one of the promising achievements in the fields of materials science and mechanical engineering, which provides a solution to one of the problems of the new generation power plants. One promising area of research aimed at increasing the efficiency of electricity generation is discussed in this article on the characteristics of super-critical carbon dioxide power plant cycles and the properties of high-speed generators that can be used in such power plants. The applicability of amorphous materials in the construction of high-speed electrical machines can solve the efficiency problem of such machines, enabling its use in new generation power plants.

Keywords: *supercritical CO₂, electromagnetic machine, amorphous material.*

Összefoglalás

Jelen cikk célja, hogy bemutassa az anyagtudomány területén elért egyik ígéretes eredmény alkalmazhatóságát a gépészet egy területén, az új generációs erőművek egyik problémájának lehetséges megoldásában. A cikk áttekinti a villamos energia előállításának hatásfoknövelése érdekében folytatott kutatások egyik ígéretes területének, a szuperkritikus szén-dioxid munkaközegű erőművi körfolyamatok jellegzetességeit, valamint az ilyen erőművekben alkalmazható, nagy forgássebességű generátorok tulajdonságait. Az amorf szerkezetű anyagok alkalmazhatósága nagy forgássebességű villamos gépek építésére megoldhatja az ilyen gépek hatásfokbeli problémáját, teret engedve az új generációs erőművekben történő alkalmazásnak.

Kulcsszavak: *szuperkritikus CO₂, generátor, amorf anyag, fémüveg.*

1. Bevezetés

A világ villamosenergia-igénye folyamatosan növekszik [1], az ipari automatizálás és az elektromobilitás ugrásszerű terjedése megköveteli a villamosenergia-ellátó hálózat fejlesztését. Azért, hogy ez a fejlesztés mérsékelt károsanyag-kibocsátással járjon, a kapacitásbeli fejlesztés mellett az erőművek hatásfokának növelésére is figyelmet kell fordítani. A mai, gőz munkaközegű, Rankine-ciklusú erőművek több mint 100 éves múltra tekintenek vissza, a korszerű erőművek hatásfo-

ka azonban alig haladja meg a 30%-ot [2]. A hatásfok további növelése csak új technológiák bevezetésével lehetséges. Az egyik ígéretes technológia a szuperkritikus állapotú szén-dioxid (sCO₂) alkalmazása az erőművi körfolyamat munkaközegeként. Az sCO₂-munkaközeg leginkább a termodinamikai Brayton-ciklus alkalmazása mellett ígér kiváló lehetőséget nagyobb termodinamikai hatásfok elérésére, akár 47%-ot is [3]. Az sCO₂ a tulajdonságai miatt újfajta erőművi berendezések fejlesztését igényli; az sCO₂-turbina például tizedakkora méretben ad ugyanakkora teljesít-

ményt, mint egy gőzturbina. Ennek eredményeképpen a turbina fordulatszámja jelentősen nagyobb, így egy hagyományos generátort csak fordulatszám-lassító áttételen keresztül lenne képes meghajtani. Erőművi teljesítmények esetében az áttétel hatásfoka rontja az energiaátalakítási lánc összhatásfokát, mindamelllett, hogy a telepítési és üzemeltetési költségei is jelentősek. Ennél jobb megoldás a nagy forgássebességű generátor alkalmazása, amely közvetlen kapcsolatban lehet a nagy forgássebességű turbinával. A korszerű teljesítményelektronikai eszközök segítségével a generátor által előállított, a hálózati frekvenciához képest nagyobb frekvenciájú feszültségből jó hatásfokkal lehet akár 50 Hz-es, akár egyenfeszültséget előállítani. Nagy távolságok áthidalására több egyenáramú távvezeték épült ki az elmúlt évtizedekben. Ezek előnye a nagyobb energiaátvitel, a kisebb veszteségek (nincs szkinhatás, interferencia stb.), illetve a szinkronizálás szükségtelensége miatt az áthidalható távolságot nem korlátozzák stabilitásbeli problémák [4].

A nagy forgássebességű generátorok állórésze azonban Fe-Si lágymágneses anyagokból készül, amelyek nagyfrekvenciás mágneses tulajdonságai kedvezőtlenül alakulnak. Emiatt a nagyobb frekvencián (fordulatszám) üzemeltetett villamos gép a megnövekedett vasvesztés miatt jobban melegszik, hatásfoka kisebb. Az új anyagtudományi kutatások azt mutatják [5], hogy az amorf szerkezetű, vasalapú lágymágneses anyagok jelentősen jobb nagyfrekvenciás mágneses tulajdonságokkal bírnak, így azok alkalmazásával növelt hatásfokú, nagy forgássebességű villamos gépek építhetők. Az amorf anyagok alkalmazásával épített generátorok jó hatásfokkal képesek a nagy fordulatszámú, sCO₂-turbínától érkező mechanikai energiát villamos energiává alakítani, így hozzájárulnak ennek az erőművi technológiának az alkalmazásához.

2. A szuperkritikus szén-dioxid munkaközegű erőművek sajátosságai

A szuperkritikus szén-dioxidot (sCO₂) alkalmazó termikus körfolyamat segíthet a klímaváltozás elleni harcban, mivel a munkaközeg nagyobb termikus hatásfokot eredményez kisebb beruházási költségek mellett, mint a legkorszerűbb, gőz munkaközegű (Rankine-) körfolyamatok. Az sCO₂ körfolyamatot alkalmazó erőművek kompakt kialakításúak, az előrejelzések szerint tizedakkora helyigényűek [6]. Az sCO₂ munkaközeg egyedi jellemzői széles körű érdeklődést váltanak ki az ezt

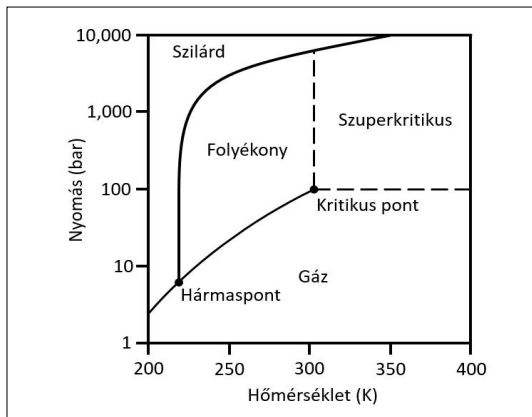
alkalmazó körfolyamat iránt, ezért számos kutatócsoport foglalkozik az erőművi alkalmazással [7].

Ha a szén-dioxidot a kritikus hőmérséklete és nyomása felett tartják, akkor speciális, szuperkritikus állapotba kerül. Ebben az állapotában folyadékhoz közeli sűrűség és a gázokra jellemző, kis viszkozitás jellemzi, amely paraméterek ráadásul a hőmérséklet vagy a nyomás kis változtatásával drámaian módosíthatók, így az sCO₂ rendkívül hatékony munkaközeg termikus körfolyamat megvalósításához. A CO₂ fázisdiagramja az **1. ábrán** látható.

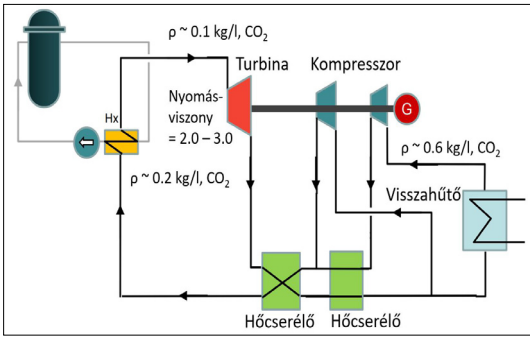
Az sCO₂-körfolyamat felhasználási területei rendkívül szélesnek ígérkeznek: minden más, nagy hőmérsékletű hőenergia villamos energiává alakításánál jobb hatásfokkal alkalmazható, mint a hagyományos gőz körfolyamatok.

Felhasználható például energiatároló rendszerek kialakításához [8], koncentrált naperőmű létesítéséhez [9], új hibrid geo-nap hőerőmű [21], vagy hulladékhő-hasznosító berendezéshez [10].

További felhasználási terület lehet a 4. generációs atomerőművekben, a hőtechnikai körfolyamat munkaközegeként. Segítségével kisebb, de jobb hatásfokú atomerőművek építhetők, ami például a katonai nukleáris meghajtású hajók és tengeralattjárók esetében jelentős előnnyel jár. Az ilyen erőművek hatásfoka a számítások szerint eléri a 47%-ot [3], és biztonság szempontjából is előnyös az sCO₂ igen jelentős természetes konvekciós áramlása [11]. Több kutatás is foglalkozik a 4. generációs atomerőművek követelményeinek megfelelő, növelt hatásfokú erőművi körfolyamat kiválasztásával; a kutatások eredményeképpen látható, hogy az sCO₂ munkaközeg mind megvalósíthatóság és költség, mind hatásfok tekintetében a legjobb választás [12].



1. ábra. A szén-dioxid fázisdiagramja, [13] alapján szerkesztve

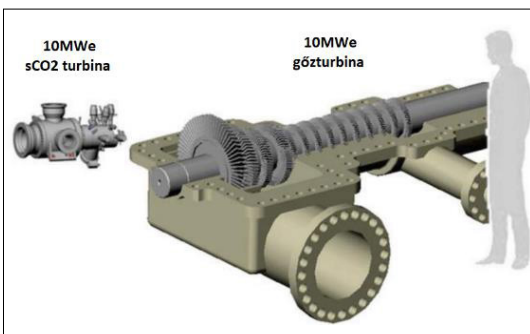


2. ábra. Rekompresziós Brayton-körfolyamat $s\text{CO}_2$ munkaközeggel, nagy hőmérsékletű atomerőművekhez; [14] alapján szerkesztve

Az $s\text{CO}_2$ munkaközeggel ideálisan Brayton-körfolyamat valósítható meg. A kicsi nyomásviszony (2-3) miatt többféle elrendezésben hőcserélőkkel, többfokozatú kompresszorokkal és visszahűtőkkel kiépített elrendezéseket vizsgálnak szimuláció és mérés segítségével. A 2. ábrán két kompresszort tartalmazó, hőcserélős Brayton-körfolyamat kapcsolási rajza látható, amelyet a [15] tanulmány szerzői méréssel és szimulációval is vizsgáltak.

Az $s\text{CO}_2$ alkalmazásával az erőművi berendezések mérete jelentősen csökken [16] a nagy sűrűségű munkaközeg alkalmazása miatt. Az egyes energetikai berendezések mérete nagyjából ötöde, tizede a gőzzel üzemelő berendezéseknek; a 3. ábra 10 MW tengelyteljesítményű $s\text{CO}_2$ - és gőzturbina arányos összehasonlítását mutatja.

Az ilyen mértékű méretcsökkentés számos technikai problémát hoz magával. A problémák egy csoportja a kisebb méretből eredő nagyobb fordulatszám miatt adódik; ilyen például a tömítés megoldása vagy a kiegyensúlyozottság kérdése. A nagy forgássebességű turbina tengelytömítésének nagy nyomáskülönbséget kell tömítenie, amire leginkább érintkezésmentes tömítések (pl. dry gas seal [17]) alkalmasak.



3. ábra. 10 MW-os gőzturbina és $s\text{CO}_2$ -turbina méretének összehasonlítása [18] alapján

Az $s\text{CO}_2$ alkalmazása munkaközegként a következő előnyökkel és hátrányokkal jár [19]:

- egyszerűbb és kompakt felépítés,
- nagyobb hatásfok,
- potenciálisan kisebb beruházási költség,
- nagy hőcszerelő felület szükséges,
- vastag falú csövek és berendezések a nagy nyomás miatt,
- turbina- és kompresszorkivitelezési nehézségek, újfajta tömítési megoldások szükségesek,
- nagyobb üzemeltetési költségek.

3. A nagy forgássebességű elektromágneses gépek veszteségei

Villamos forgógépek, generátorok és villamos motorok esetében a teljesítmény és a fordulatszám növelését mechanikai, szilárdsági korlátok, valamint az elektromos veszteségek jelentős növekedése korlátozhatja.

A növekvő veszteségek növekvő hőfejlődést, intenzívebb, jobb hatásfokú, bonyolult, drága hűtőrendszereket igényelnek.

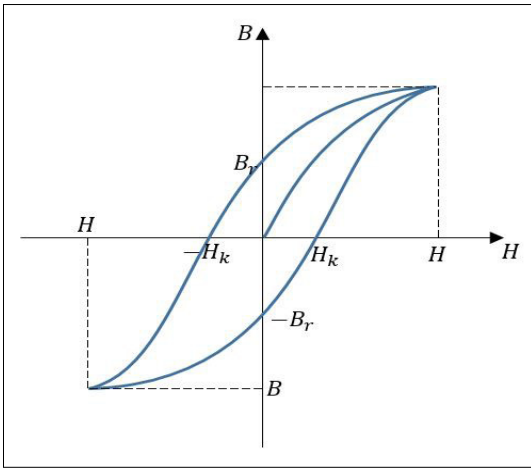
A vasvesztesség a váltakozó átmágnesezésnél hőtermeléssel járó energiavesztés, mely a frekvencia, így a fordulatszám függvényében növekvő értékű. A vasvesztesség összetevőinek fizikai természete szerint három veszteségre bontható:

- hiszterézisvesztés,
- örvényáram-vesztés, mely ferritek esetében elhanyagolható mértékű a többi veszteséghez viszonyítva,
- doménfalmozgásból adódó veszteség.

A villamos gépek vasmagjában alkalmazott ferromágneses anyagok változó fluxus hatására létrejövő mágnesezési görbéje hiszterézises jelleget mutat (4. ábra) [20].

A ferromágneses anyagok gerjesztéssel történő felmágnesezését követően, a gerjesztés megszűnésével megjelenő remanens indukciót (B_R) csak ellentétes előjelű gerjesztéssel lehet megszüntetni. A B-H görbe vízszintes tengellyel alkotott metszéspontja a koercitív erő (H_K), ami a mágnes remanens indukciójának megszüntetéséhez szükséges mágneses tér értéke.

Váltakozó mágneses térbe helyezett vasmag esetében az indukció változása nem megy végbe veszteségmentesen, az átmágnesezéshez szükséges energia mennyisége arányos a hiszterézisúrok által körülzárt területtel. Villamos forgógépek esetében az egységnyi idő alatt végbemenő átmágnesezések száma arányos a gép fordulatszámával, így a létrejövő teljesítményvesztés is arányos azzal. A hiszterézisvesztés nagysága



4. ábra. A ferromágneses anyagokra jellemző B-H görbe

a frekvenciával egyenesen arányos összefüggést mutat (1).

$$P_{hiszt} = k_{hiszt} \cdot \Psi^2 \cdot f, \tag{1}$$

ahol k_{hiszt} geometriától függő tényező, mely a vasmag térfogatával arányos nagyságú, Ψ pedig a fluxus.

A hiszterézisvesztés hatékony csökkentése a koercitív erő értékének csökkentésével lehetséges, mely elsősorban az anyagjellemzők függvénye. Forgó villamos gépekben ezért elterjedten alkalmaznak lágymágneses anyagokat azok kisebb koercitív erő értékei és kisebb hiszterézisvesztései miatt.

Változó fluxus hatására a vasmagban indukálódott örvényáramok is veszteséget okoznak. Az örvényáram által okozott veszteség nagysága fordított arányosságot mutat a vasmag ellenállásával [20].

Az örvényáram miatti teljesítményvesztés a frekvencia és a fluxus négyzetével arányosan növekszik (2)

$$P_{\text{örv}} = k_{\text{örv}} \cdot \Psi^2 \cdot f^2, \tag{2}$$

ahol k a geometriától függő tényező, Ψ a fluxus.

Az örvényáram-vesztés csökkentésének bevált módszere a vastestnek egymástól elektromosan elszigetelt, vékony lemezekből történő összeépítése.

Mágneses tér hatására a ferromágneses anyagokban található domének határai elmozdulnak, ez a doménfalmozgás jelensége. Az elmozdulás transzlációs mozgásból, a telítés környezetében

pedig a mágneses momentumoknak a külső tér irányába fordulásából tevődik össze. A mozgás hatására egyes domének mérete növekszik, más doméneké csökken. Változó mágneses térben a domének változása ciklikus, mely mozgás energiavesztéssel jár. A doménfalak mozgásából származó teljesítményvesztés a frekvenciával egyenesen arányos.

Nagy fordulatszámú villamos motorok és generátorok esetén a nagy frekvencia miatt kialakuló vasvesztés mértéke drámai növekedésnek indul, ahogy az 1. táblázatban is látható [5].

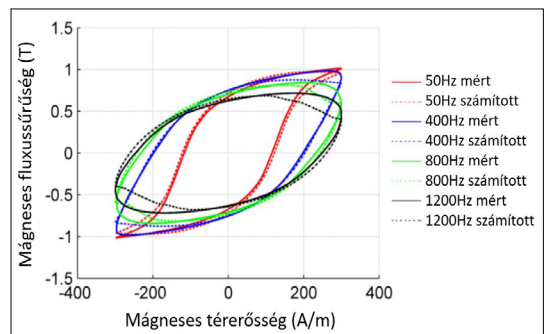
A jelentős növekedés oka az 5. ábrán is látható B-H görbe alakjának a frekvencianövekedés hatására létrejövő változása, aminek előidézője az, hogy a domének mágneses orientációjának megváltozása nem képes követni a mágneses tér irányváltozásának sebességét, és ennek hatására az anyag koercitív ereje növekszik meg számottevően [5].

A villamos forgógépek lágymágneses lemezeit gyártó cégek erőfeszítései ellenére a kristályos mágneses anyagok nagyfrekvenciás használhatóságának kiterjesztése az elérhető határokat súrolja.

A hatásfoknövelés szükségessége, pl. villamos motorok esetében, az egyre szigorodó előírások miatt megkérdőjelezhetetlen.

1. táblázat. NO10 és NO12 mágneses lemezek vasvesztései [5]

Osztály	Vastagság (mm)	Vasvesztés 400 Hz-en (W/kg)	Vasvesztés 2500 Hz-en (W/kg)
N010	0,10	13,0	135
N012	0,12	13,5	132



5. ábra. Példa a B-H görbe nagyfrekvencián mutatott torzulására, [22] alapján

Az elektromágneses gépek esetében a hatáskönnövelés egyik ígéretes lehetősége a vasalapú amorf ötvözetek alkalmazása. Ezen anyagokban, a nanokristályosított hőkezelés után a koercitív erő jelentős csökkenése figyelhető meg, ami abból ered, hogy a szemcseméret és a koercitív erő közötti inverz kapcsolat megváltozik, és a koercitív erő a szemcseméret függvényében csökkenő tendenciát mutat, melynek eredményeként jelentős vasvesztés-csökkenés mutatkozik.

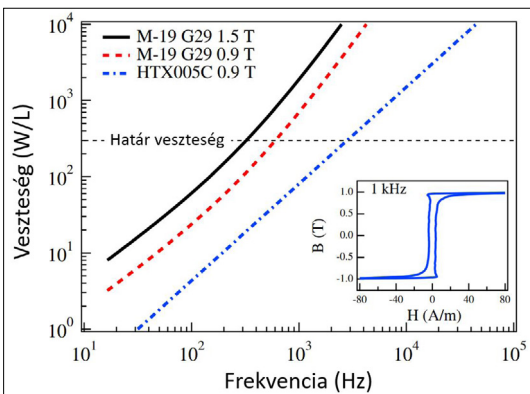
Villamos forgógépek esetében az úgynevezett vesztési teljesítménysűrűség az elektromos vesztésgteljesítmény és a motortérfogat hányadosaként kapható. Léghűtéses, mágneses forgógépek esetében ennek határértéke megközelítőleg 300 W/L-re tehető.

A 6. ábra szemlélteti egy nanokristályos HITPERM-ötvözet (kék színű pontvonal) vesztési teljesítménysűrűségét a frekvencia függvényében, más, elterjedten használt, kristályos anyagok hasonló tulajdonságaival összehasonlítva. Látható, hogy a nanokristályos HITPERM-anyagok alkalmazásával azonos vesztés egy nagyságrenddel nagyobb frekvencia esetén jelentkezik.

A HITPERM-ötvözetek kisebb koercitív ereje mellett másik előnyük a 0,005–0,050 mm-es vastagságú lemezek gyárthatósága, ami az örvényáram-vesztés csökkenésén keresztül további vasvesztés-csökkenést okoz [20].

A FINEMET-ötvözet alkalmazása szintén ígéretes ezekben az alkalmazásokban; többféle hőkezelési mód segítségével további tulajdonságjavulást lehet elérni [23].

A nanokristályos anyagok alkalmazásának korlátja lehet az a tény, hogy a mágneses tulajdonságok javulása a mechanikai tulajdonságok romlásával jár, ami az anyag elridegését, töré-



6. ábra. Példa a vesztések frekvenciafüggésére különböző anyagtypusok esetén [20]

kennyé válását jelenti. Ez külön korlátot szab az ilyen vékony lemezek mechanikai úton történő gyárthatóságának. Új gyártási eljárások alkalmazása válik szükségessé, pl. lézeres vágás, melynek alkalmazása igen biztató eredményeket hozott a nagy sebességű elektromotorok és generátorok vasvesztéseinek csökkentése terén [5, 24].

4. Összefoglalás, következtetések

A szuperkritikus szén-dioxid (sCO₂) munkaközegű termodinamikai körfolyamatok sajátosságai miatt kisméretű, de nagy forgásebességű turbina alkalmazása szükséges, ami összetett műszaki problémák megoldását teszi elengedhetetlenné. A turbina nagy szögsebességű kihajtótengelyének fordulatszámát csökkenteni kell ahhoz, hogy hagyományos szinkrongenerátorral a mechanikai energiát villamos energiává alakítsuk. Erőművi teljesítmények (100 MW) mellett az ilyen fordulatszámlassító áttételek alkalmazása meglehetősen rossz hatásfokú, nagy beruházási és üzemeltetési költségként jelentkezik. Az erőművek hatásfokjavításához más, újfajta technológiák bevezetése szükséges annak érdekében, hogy a fordulatszám-lassító áttétel alkalmazását ki lehessen különböztetni.

Az elektromágneses gépek hatásfoka a fordulatszámuk növekedésével csökken. Ez többek között a vasvesztés növekedésével magyarázható, mivel a lágymágneses anyagokban a koercitív erő a frekvencia növekedésével növekszik, a B-H-grafikonon a hiszterézishurok szélesedik. Ez, anyagtól függően, egy bizonyos frekvencia felett nagymértékű hatásfokromlást okoz, a villamos gép jelentős melegedése mellett. A vasvesztés nagy fordulatszám (frekvencia) melletti csökkentése lehetővé teszi az sCO₂ munkaközegű erőművi körfolyamatban a turbina és a generátor közötti fordulatszám-lassító áttétel elhagyását, így a turbina közvetlen módon hajthatja a generátort. Ezzel a meghajtással érhető el a legnagyobb energiaátalakítási hatásfok, így az energiahatékonyság növelhető, a környezeti terhelés pedig csökkenthető.

A lágymágneses anyagok közül az amorf szerkezetű, vasalapú fémüvegek esetében legkisebb a koercitív erő nagyfrekvenciás mágneses térben, így ezek alkalmazása igen biztató eredményeket hozott a nagy szögsebességű elektromotorok és generátorok vasvesztéseinek csökkentése terén. Az ilyen amorf anyagok alkalmazása villamos gép építésére újfajta gyártási és anyagvizsgálati eljárások kifejlesztését igényli az alapanyag

sajátosságai miatt. Több hazai és nemzetközi kutatás eredményét összegezve látható, hogy amorf anyagokat felhasználva lehetséges nagy fordulatszámú, növelt hatásfokú villamos gépet létrehozni.

Köszönetnyilvánítás

A közleményben bemutatott kutatást az Új Széchenyi Terv keretében az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 projektek részeként hajtották végre. A jelen cikkben megjelentített eredményekhez az EFOP-3.6.1-16-2016-00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” c. projekt által finanszírozott kutatások járultak hozzá. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] R. G. Newell, D. Raimi, G. Aldana: *Global Energy Outlook 2019: The Next Generation of Energy*. Report 19-06/2019. <http://www.econ2.jhu.edu/courses/101/GlobalEnergyOutlook2019.pdf>
- [2] A. Zandian, M. Ashjaee: *The thermal efficiency improvement of a steam Rankine cycle by innovative design of a hybrid cooling tower and a solar chimney concept*. *Renewable Energy*, 51. (2013) 465–473. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.051>
- [3] C. Geng, Y. Shao, W. Zhong, X. Liu: *Thermodynamic Analysis of Supercritical CO₂ Power Cycle with Fluidized Bed Coal Combustion*. *Coal and Biomass Combustion*, 2018. Article ID 6963292, <https://doi.org/10.1155/2018/6963292>
- [4] K. Meah, S. Ula: *Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007. 1–5, <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385993>
- [5] Szabó A.: *Gondolatok egy ígéretes lágymágneses anyagról*. *Magyar Acél*, 2017. ősz, 41–43. <http://www.mvae.hu/kiadvanyok/mvae-szeptember-web.pdf>
- [6] T. Conboy, S. Wright: *Experimental Investigation of the S-CO₂ Condensing Cycle*. Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, May 24–25, 2011, Boulder, CO, SAND2011-2690C
- [7] Yoonhan Ahn, et. al.: *Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development*. *Nuclear Engineering and Technology*, 47/6. (2015) 647–661. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.06.009>
- [8] S. Hameer, J. L. van Niekerk: *A review of large scale electrical energy storage*. *International Journal of Energy Research*, 39/9. (2015) 1179–1195. <https://doi.org/10.1002/er.3294>
- [9] Y. Sun et al.: *Coupling supercritical carbon dioxide Brayton cycle with spray-assisted dry cooling technology for concentrated solar power*. *Applied Energy*, 251. (2019) <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113328>
- [10] M. Mohagheghi, J. Kapat: *Thermodynamic optimization of recuperated sCO₂ Brayton cycles for waste-heat recovery applications*. The 4th International Symposium – Supercritical CO₂ Power Cycles 2014, Pittsburgh, USA.
- [11] K. Brun, P. Friedman, R. Dennis: *Fundamentals and applications of supercritical carbon dioxide (sCO₂) based power cycles*. Woodhead Publishing, 2017.
- [12] V. Dostal, P. Hejzlar, M.J. Driscoll: *The Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle: Comparison to Other Advanced Power Cycles*. *Nuclear Technology*, 154/3. (2006) 283–301. <https://doi.org/10.13182/NT06-A3734>
- [13] Ideen Sadrehaghighi: *Multiphase Flow*. CFD Open Series, Report number: 2.11, aug. 2020. https://www.researchgate.net/profile/Ideen-Sadrehaghighi/publication/320107451_Multiphase_Flow/links/5f4741df458515a88b706909/Multiphase-Flow.pdf
- [14] S. A. Wright et. al.: *Modeling and Experimental Results for Condensing Supercritical CO₂ Power Cycles*. Sandia Report. SAND2010-8840, 2011.
- [15] S. A. Wright, et. al.: *Operation and Analysis of a Supercritical CO₂ Brayton Cycle*. Sandia Report. SAND2010-0171, 2010.
- [16] Q. Zhu: *Innovative power generation systems using supercritical CO₂ cycles*. *Clean Energy*, 1/1. (2017) 68–79. <https://doi.org/10.1093/ce/zkx003>
- [17] Z. M. Fairuza, I. Jahn: *The influence of real gas effects on the performance of supercritical CO₂ dry gas seals*. *Tribology International*, 102. (2016) 333–347.
- [18] S. A. Wright, M. Anderson: *Supercritical CO₂ cycle for advanced NPPs*. Workshop on New Cross-cutting Technologies for Nuclear Power Plants, 2017.
- [19] G. Stefan et. al.: *Evaluation of sCO₂ power cycles for direct and waste heat applications*. 2nd European sCO₂ Conference 2018, <https://doi.org/10.17185/dupublico/46074>
- [20] J. M. Silveyra et. al.: *High speed electric motors based on high performance novel soft magnets*. *Journal of Applied Physics* 115/17. 17A319 (2014), <https://doi.org/10.1063/1.4864247>
- [21] S. Duniam, F. Sabri, K. Hooman: *A novel hybrid geo-solar thermal design for power generation in Australia*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 27 March 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.03.023>
- [22] Du Ruoyang, Robertson P.: *Dynamic files-Atherton Model for Determining the Magnetic Power Loss at High Frequency in Permanent Magnet Machines*. *IEEE Transactions on Magnetics*. 51/6. (2015) <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2382594>
- [23] Szabó A., Sánta R., Lovas A., Novák L.: *A FINE-MET-ötvezet tulajdonságváltozásának vizsgálata hagyományos, impulzusos és mechanikai feszültség alatt végzett hőkezelést követően*. *Acta*

- Materialia Transylvanica, 3/1. (2020) 43–49., <https://doi.org/10.33923/amt-2020-01-08>
- [24] A. Szabó, A. Nagy, G. Kozsely: *Laser cutting technology development for Fe based metallic glass*. 2019 IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY). <https://doi.org/10.1109/SISY47553.2019.9111604>
- [25] Berta I., Kádár I., Szabó L.: *Váltakozó áramú rendszerek*. 2012. https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tam-op425/0048_VIVEM111/index.html
- [26] M. Persichilli et al.: *Supercritical CO₂ Power Cycle Developments and Commercialization: Why sCO₂ can Displace Steam*. Presented at Power-Gen India & Central Asia 2012, New Delhi, India. <https://www.echogen.com/documents/why-sco2-can-displace-steam.pdf>