

M. Baće - V. Knapp

SAOPĆENJE

Elektrotehnički fakultet, Zagreb

MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA SUPRAVODIČKOG SPREMNIKA ENERGIJE

SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE, POSSIBILITIES AND
LIMITATIONS

SADRŽAJ - Spremanje energije od velike je važnosti kako za korištenje novih izvora energije, tako i za bolje korištenje konvencionalnih izvora.

Posljednjih godina razmatra se spremanje energije u magnetskom polju velikih supravodičkih magneta. U objavljenim prijedlozima ne vodi se računa o gubitcima u supravodičkom sistemu. Namjena priloga je da ukaže da na primjenu supravodičkog spremnika energije pri uvjetima koje nameće elektro-energetski sistem postoje ozbiljna tehničko-ekonomska ograničenja.

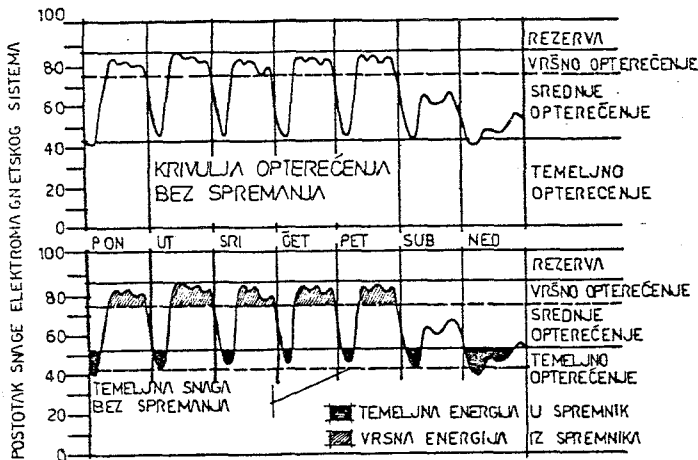
ABSTRACT - Energy storage is of great importance for the exploitation of new energy sources as well as for the better utilisation of conventional ones. Several proposals in recent years have suggested that superconducting magnets could be used as energy storage in large electricity networks. It is a purpose of this note to point out that the requirements which have to be met by energy storage in a large electricity network place serious limitation on the possible use of superconducting magnetic energy storage.

1. UVOD

Efikasnija proizvodnja električne energije zahtjeva sistem za spremanje energije, kako bi se zadovoljile potrebe za električnom energijom bez pretjeranog investiranja u nove elektrane. Dnevna varijacija potrošnje pokazuje tipični skok s niskog noćnog nivoa na mnogo viši u toku dana. Osim toga postoje i tjedne varijacije - pad u toku vikenda, te sezonske varijacije potrošnje.

Na primjeru jedne tipične tjedne krivulje potrošnje, (dijagram 1) može se vidjeti na koji način bi pomoglo spremanje energije. Gornja krivulja potrošnje bez spremanja energije pokazuje da takozvano temeljno opterećenje, a to su najefikasniji proizvođači - hidroelektrane, nove termo-elektrane, nuklearne elektrane čine oko 45 % kapaciteta za proizvodnju električne energije. U području srednjeg opterećenja uključuju se manje efikasne, starije termocentrale.

TJEDNA KRIVULJA OPTEREĆENJA ELEKTROENERGETSKOG
SISTEMA



DIJAGRAM 1

Treba reći da uključivanje, isključivanje i općenito variranje snage utiče na dodatno smanjivanje efikasnosti. Preostalih, približno 15 % snage je takozvano vršno opterećenje. Do skora je bilo uobičajeno da se i vršna opterećenja podmiruju proizvodnjom iz manje efikasnih jedinica, na isti način kao i srednja opterećenja. Zadnjih godina su razvijeni, baš za tu namjenu, generatori s plinskim turbinama, koje karakteriziraju niski investicioni troškovi i brza izgradnja, ali i niža termalna efikasnost i potrošnja skupljeg goriva (prirodnog plina ili plinskog ulja).

Vršno opterećenje je stoga područje primarnog interesa za primjenu sistema za spremanje energije. Donji dijagram je ilustracija slučaja da postoji i da je uključen sistem za spremanje energije koji sprema energiju iz temeljnog opterećenja, a troši u vršnim periodima. Očito su dvije promjene: porastao je nivo temeljnog jeftinijeg opterećenja, kapacitet srednjeg, nešto skupljeg opterećenja je smanjen, a vršno opterećenje ide u cijelosti iz energetskog spremnika, te se na taj način umjesto skupog i deficitarnog goriva za plinske turbine, troši ugljen ili nuklearno gorivo u centralama za temeljno opterećenje.

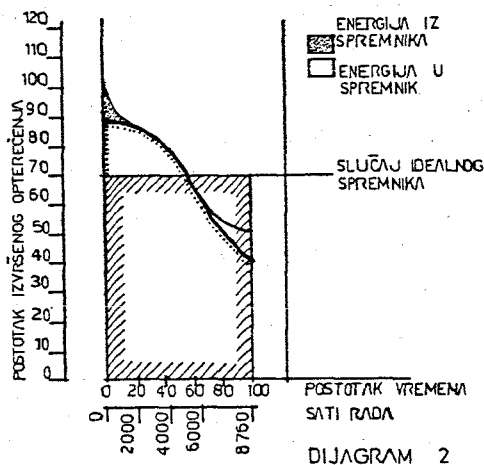
Postrojenje efikasnog sistema za spremanje je u sklopu konvencionalnih elektroenergetskih sistema vezano samo na pitanje bolje ekonomičnosti proizvodnje energije. Što se tiče primjene alternativnih prirodnih izvora energije, npr. solarne, energije vjetra, plime i oseke, sistem za spremanje energije je neophodan zbog, bilo periodičnosti, bilo neravnomjernosti snage prirodnih izvora. Daka-ko, zahtjevi na energetske spremnike bi u tom slučaju bili znatno veći, no svojim postojanjem oni bi u principu omogućili korištenje navedenih prirodnih izvora energije.

2. OPĆI EKONOMSKO-ENERGETSKI KRITERIJI

Spremanje električne energije je redovito povezano s izvjesnom transformacijom u oblik koji se dađe spremiti, i zahtjeva reverznu transformaciju prilikom trošenja iz spremnika. Kod praktički jedinih velikih razvijenih sistema spremanja, pumpnih (hydro) centrala poznatijih kao reverzibilne hidrocentrale, elektroenergija je spremljena u potencijalnu energiju vode. Kod akumulatora je to elektro-kemijska energija, kod zamašnjaka kinetička energija. I kod sistema koje možemo smatrati čisto električnim, kao što je kondenzator ili supravodljivi solenoid, radi se o transformaciji izmjenične struje u istosmjernu i obratno. Pri svakoj transformaciji dolazi do izvjesnog gubitka energije. Veličina tog gubitka ovisi o tipu transformacije. Drugi tip gubitka nastupa kad je energija transformirana i uskladištena, a veličina gubitka općenito je funkcija vremena u toku kojeg je energija spremljena. Stoga primjena čistih energetskih kriterija na energetski spremnik vodi do definicije efikasnosti sistema za spremanje kao umnoška efikasnosti ulazne i izlazne transformacije, kao konstantne veličine i vremenski promjenljive efikasnosti čuvanja spremljene energije. Ovaj drugi faktor može s vremenom postati zanemarivo mali, štoviše može biti i negativan, ako u toku čuvanja spremljene energije pomoćni uređaji potroše više energije od one koja je spremljena. Treba reći da se kod iskazivanja efikasnosti pojedinog sistema za spremanje energije najčešće iskazuje samo ukupni koeficijent efikasnosti ulazne i izlazne transformacije što stvara uvjerenje da je problem efikasnog spremanja energije za najmanji dnevni, te tjedni ili čak sezonski ciklus manji nego što on to ustvari jest.

Ekonomski kriterij je odlučujući pri procjeni podesnosti energetskeg spremnika i on uključuje nužno spomenuti energetski kri-

terij iskazujući gubitke energije kao troškove uskladištenja energije. Jedan tipični dijagram profila godišnjeg opterećenja, (dijagram 2) ilustrirat će bolje primjenu ekonomskih kriterija.



Na dijagramu su prikazani efekti spremanja energije za potrebe samo vršnih opterećenja. Smatra se da su vršna opterećenja ona koja traju manje od 1000 - 1300 sati godišnje. Može se procijeniti da u ukupnoj proizvedenoj energiji, na ovom dijagramu, vršno opterećenja sudjeluje s 1.5 %, dok u zahtjevima na instaliranu snagu sudjeluje s čak 12 %. Drugim riječima, efikasni spremnik energije godišnjeg kapaciteta oko 2 % proizvedene energije mogao bi efektivno povećati instaliranu snagu za 10 % bez gradnje novih elektrocentrala. Na dijagramu je naznačen i efekt "idealnog" spremnika - onog koji bi potpuno izravnao krivulju proizvodnje elektroenergije. Procjena iz dijagrama kaže da bi potrebni godišnji kapacitet bio oko 15 % ukupne energije, a zahtjevi za instaliranom snagom bi pali na oko 70 % vršnog opterećenja.

Zbog nevedenih gubitaka energije pri uskladištenju, spremanje energije u okviru elektroenergetskog sistema može ali i ne mora značiti uštedu energije. Sve zavisi da li će efikasnija proizvodnja energije za uskladištenje u postrojenjima temeljnog opterećenja kompenzirati gubitak. No i u slučaju gubitka energije, spremanje se može isplatiti jer se umjesto skupljeg plinskog ulja ili prirodnog plina troši ugljen ili nuklearno gorivo. Ekonomski kriterij svakako

mora k tome uzeti u obzir i investicione troškove izgradnje energetskog spremnika svedene na jedinicu snage koju spremnik može dati te na jedinicu spremljene energije. Ekonomski će izgradnja energetskih spremnika biti opravdana ako je cijena jedinice energije proizvedene u postojećim elektranama, uvećana za gubitke uskladištenja i uzevši u račun cijenu investicije i održavanja spremnika energije, manja od one proizvedene u novoj elektrani koja bi radila djelomično opterećena.

Razvijene metode spremanja energije su reverzibilne hidrocentrale ili pumpne stanice (hydro), kao "veliki" spremnici, te olovni akumulatori kao "mali".

U razvoju su novi, poboljšani olovni akumulatori, niz novih baterija od kojih se čini da Li-S ima najveću perspektivu, sistemi na komprimirani zrak, inercijalni spremnici - superzamašnjaci, te supravodljivi magneti.

U odnosu na supravodičke spremnike u zadnjim godinama pojavilo se više prijedloga, koji međjutim nisu otišli puno dalje od izlaganja osnovnih principa. Namjena je ovog priloga da ukaže da na upotrebu SV spremnika energije, pri uvjetima koje nameće elektroenergetski sistem, postoje ozbiljna tehničko-ekonomska ograničenja.

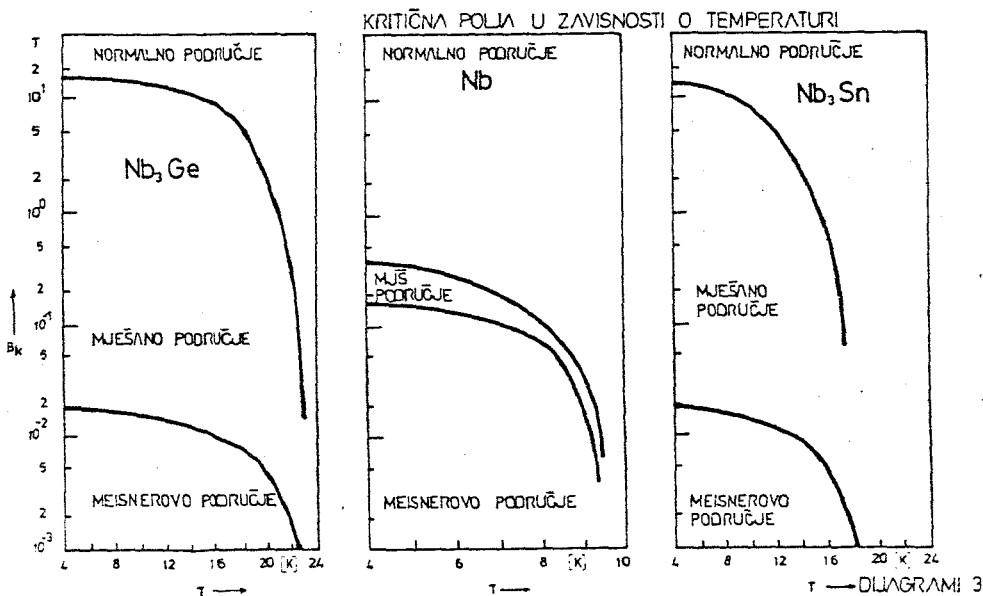
3. SUPRAVODIČKI SPREMNIK

Načini li se dugačak solenoid ili toroidalna zavojnica u kojoj se protokom struje uspostavi magnetsko polje indukcije B , gustoća energije polja iznosi $\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$. Pri indukciji od 1 T ta energija iznosi 0.4 MJ/m³, odnosno 1/9 kWh/m³, želimo li se povezati s praktičnim elektromagnetskim jedinicama. U odnosu na energetski sistem i u njemu interesantne količine, radi se o vrlo maloj energiji. Prijedlozi da se energija sprema u formi elektromagnetske energije predviđaju stoga velike volumene polja i velike indukcije. Jedan i drugi zahtjev isključuju odmah iz razmatranja klasične magnete u kojima bi omski gubitci bili nesrazmjerno veliki spram spremljene energije. Tek su SV magneti omogućili gradnju magneta s volumenom polja od više desetaka m³ te sa indukcijama i preko 10 T. Sa danas tehnički najrazvijenijim SV materijalima NbTi i Nb moguće su vrijednosti indukcije do oko 8 T. Nb₃Sn pruža mogućnost dosizanja vrijednosti od 10 i više tesla, ali je barem za sada ovaj materijal sa manje povoljnim mehaničkim osobinama. Računajući sa 10 T gustoća energije je 40 MJ/m³, odnosno 9.1 kWh/m³. Želimo li spremnik za količinu energije

koja ima izvjesno značenje u okviru energetskog sistema, recimo oko 10 MWh; onda to traži SV magnet volumena iznad 1000 m^3 , pri indukciji od 10 T. Premda su to volumeni znatno iznad onog što danas postoji magneti takovih volumena predviđaju se za velike fuzione elektrane pa se može pretpostaviti da će izgradnja magneta velikih volumena biti nužna i iz tih razloga. Naravno, razmatranja ovog tipa pokazuju samo da je u principu moguće spremi energetski zanimljive količine energije u spremnik koji ima prihvatljive dimenzije. Za spomenutu energiju je to kocka stranice 10.mNa bazi takovih procjena već niz godina SV spremnik se spominje kao jedan od mogućih načina spremanja energije i predlaže se njegov razvoj [4]. Takova razmatranja čini se ne uzimaju u obzir da i u SV postoje gubitci energije. Iako su oni mali, umnažaju se vrlo nepovoljnim termodinamičkim stupnjem djelovanja te na kraju predstavljaju i ograničenje na upotrebu SV spremnika energije.

4. OGRANIČENJA SVSE

Polje indukcije od više tesla traži korištenje SV druge vrste. Nadalje, s obzirom na vrijednosti indukcije koje se želi postići, radno područje je u tzv. mješanom stanju u kojem energetsko polje prodire u unutrašnjost SV (dijagram 3). Razabire se nužnost da se SV, čak



i ako se radi o Nb_3Sn , hladi na temperaturu tekućeg helija. Inače se kritično polje reducira na nekorisne vrijednosti. Pri indukciji od više tesla gubitci su predominantno volumni. Volumni gubitci nastaju pregrupiranjem i pomicanjem cijevi magnetskog toka pri promjenama intenziteta polja. S obzirom na linearnu frekventnu zavisnost [5] može se očekivati manji doprinos. Toplinski dotok iz okoliša je prisutan bez obzira na gubitke u SV. Koliko će iznositi gubitci nije moguće odrediti iz raspoloživih podataka. Postoje, međutim, izgrađeni sistemi, odnosno projekti bazirani na praktičnim vrijednostima sa kojima se ipak mogu dobiti izvjesne orijentacione procjene. Najveći SV magneti danas su u upotrebi u visokoenergetskim istraživanjima. Magnet komore na mjehuriće u CERN-u ima oblik zavojnice promjera ~ 4 m i visine ~ 4 m, sa poljem u središtu od 3.5 T. Materijal za SV je $NbTi$, hladjenje helijem. Rashladna snaga je 900 W, dok je snaga za pogon rashladnih sistema 360 kW [6]. Uskladištena energija magnetskog polja iznosi 800 MJ - sastoji se od energije polja u zavojnici i energije rasipnog polja, koja je znatna s obzirom na relativno kratki solenoid. Volumen polja unutar zavojnice iznosi 60 m^3 pa je specifična vrijednost snage rashladnog sistema $\sim 6 \text{ kW/m}^3$. Pri ekstrapolaciji na znatno veće volumene polja može se očekivati smanjenje relativnog udjela gubitaka odvođenjem iz okoliša, no s druge strane i veći gubitci u SV pri indukciji od 10 T (uz korištenje Nb_3Sn). Ako bi rashladna snaga od 6 kW/m^3 bila posljedica samo vođenja topline, onda bi pri uvećavanju sistema ta vrijednost približno opadala s $1/L$, gdje je L linearna dimenzija sistema. Prelazom sa 60 na 1000 m^3 u takovom bi se slučaju specifična rashladna snaga reducirala na $\sim 2.4 \text{ kW/m}^3$. S obzirom na to da gubitci u SV postoje, to se ova vrijednost treba uzeti kao donja granica. Vrijednost od 3 kW/m^3 vjerojatno potcjenjuje realnu vrijednost gubitaka. Povećanje indukcije vodi na veće gubitke u SV. Sa poljem od 3.5 T gustoća ukupne uskladištene energije u zavojnici i rasipnom polju je 13.3 MJ/m^3 odnosno 3.7 kWh/m^3 . Ove vrijednosti valja usporediti sa specifičnim volumnim energetskim utroškom u rashladnom sistemu. Ako bi taj bio na osnovu ranijeg razmatranja i ekstrapolacije sa magnetu u CERN-u, približno 3 kW/m^3 razabire se vrlo nepovoljan omjer spremljene energije i trošenja energije u rashladnom sistemu. Taj omjer bi u toku 1 sata bio $R = \frac{3.7}{3} = 1.23$, tj. za oko sat i četvrt rashladni sistem utroši onoliko energije koliko je u sistemu spremljeno. Očito je da takav sistem ne dolazi u obzir za spremanje kroz period od oko 10 sati, što je nužno u primjeni u energetskom sistemu.

Iako se ne radi o izgradjenom magnetu od interesa je za ovu diskusiju i projektna studija velikog magneta za fuzioni reaktor tipa Tokamak. Magnet i zavojnica toroidalnog oblika, s poljem od 6 T na osi torusa, a kao SV materijal koristi se Nb_3Sn [7]. Dimenzije magneta daleko prelaze sve danas izgradjene. Presjek torusa iznosi u projektu 11.2×7.3 m, a radijus glavne osi torusa 6.75 m. Magnet ima volumen polja oko 3500 m^3 tj. oko 60 puta više nego magnet u CERN-u. Spremljena energija prema projektu je 60000 MJ, odnosno 16,6 MWh. Rashladno opterećenje iznosi po projektu 7.49 kW, od čega otpada 1.3 kW na gubitak u SV, a 4 kW na gubitak u kriostatu, dok je ukupna snaga rashladnog sistema 5.4 MW. Ako za ovaj projekt računamo omjer R dobivamo vrijednost $R = \frac{16.6}{5.4} \approx 3$, znatno veću nego za magnet u CERN-u. Čini se da su gubitci vođenjem potcijenjeni, jer svedu li se gubitci u kriostatu na jedinicu volumena dobiva se $\frac{4 \times 5400}{7.49 \times 3500}$ što je približno 0.8 kW/m^3 , upola manje od 1.6 kW/m^3 koliko bi iznosila ekstrapolirana vrijednost polazeći od one za magnet iz CERN-a i uz pretpostavku da se gubitci smanjuju za $1/L$, tj. najbrže. Naravno, da ni ekstrapolacija sa 60 m^3 na 3500 m^3 ne može biti vrlo pouzdana pa je jasno da će točnija ocjena gubitaka tražiti daljnji rad, odnosno podatke o performansama velikih Nb_3Sn SV magneta. U međuvremenu, može se zaključiti da ni prihvat vrijednosti omjera $R = 3$ ne bi omogućio korištenje SVSE u energetskom sistemu. Takav zaključak pogotovo vrijedi za vjerojatno nižu realnu vrijednost. Pri spremanju energije na 10 satni period najmanje trostruki, a vjerojatno barem peterostruko veći iznos energije utrošio bi se u rashladnom sistemu spremnika.

5. ZAKLJUČAK

Ne ulazeći u diskusiju raznih problema koji se postavljaju u primjeni SV magneta kao spremnika energije, kao AC-DC pretvorba, mehaničke sile, hladjenje itd., pokazuje se da je potrebno detaljnije istraživanje i procjena gubitaka u rashladnim sistemima SV magneta prije nego što bi se moglo zaključiti na njihovu upotrebljivost za spremanje energije u sistemu elektromagnetskih mreža.

REFERENCE:

- [1] Battery systems for peaking power generation
Jack T. Brown, John H. Cronin, ENS-Paris 1975.
- [2] Energy Handbook, Robert L. Loftness, Van NOSTRAND
Reinhold Company, N. York 1978.
- [3] Comparison off Peak Electricity Storages
D. Saumon, Energy storage and transportation: Prospects for
new technologies, October 22-26, 1979., Ispra Course
- [4] Superconducting Magnetic Energy Storage
W.E. Keller, LASL - 78-81, Sept. 1978.
- [5] Superconducting High Power AC Cable: Development of Conductors
and Measurement of their AC Losses,
G. Bogner, P. Penczynski, F. Schmidt, Siemens Forsch. und
Entwicl. Berichte Bd. 8 (1979) No. 1
- [6] Superconducting Magnet Systems
H. Brechna, Springer Verlag 1973.
- [7] Toroidal Magnet Design for a Tokamak Experimental Fusion Reactor,
N. Asami, K. Ioki, T. Satow, M. Tonaka, O. Ogino. K. Sako
Fusion Reactor Design Concepts
Proceedings of a Technical Committee Meeting and Workshop,
Madison, 10-21 October 1977., IAEA 1978.