

Skúsenosti so schladzovaním a zalieváním veľkých supravodivých magnetov

Peter Trojan¹, Štefan Molokáč¹, Ladislav Grega¹ a Pavol Rybár²

Experiences with overcooling and refilling of large superconducting magnets

Cooling process of big superconducting magnets from temperature of surrounding to the critical temperature is a very complicated process from economical as well as from technical view. In case when cryostat containing experimental device overcool itself from normal temperature directly with liquid helium the consumption would be considerably higher than in case that we use liquid nitrogen for first overcool. Thus whole process of overcooling would be considerably nonprofitable. The article describes experience with overflowing of superconducting magnets installed in laboratory at the Technical University in Košice, where the research project for the electric energy in the magnetic field storage takes place.

Key words: Magnetic resonance imaging, Uninterruptible power supply, Superconducting magnetic energy storage, superconducting magnet, Liquid nitrogen, Liquid helium

Úvod

SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage – supravodivý magnetický zásobník energie) je technológiou pre úschovu elektrickej energie v magnetickom poli supravodivého magnetu. Magnetické pole je generované jednosmerným elektrickým prúdom prúdiacim supravodivým vinutím magnetu. Keďže MRI zariadenia (Magnetic Resonance Imaging – magnetická rezonancia) pracujú na báze supravodivého magnetu, tento fakt značí, že MRI môže byť s istými modifikáciami použité ako SMES. Obvody PCS (Power Conditioning System – výkonová elektronika) zabezpečujú konverziu elektrickej energie uloženej vo vinutí vo forme toku jednosmerného elektrického prúdu na požadovanú formu, napr. na 3 fázový striedavý elektrický prúd.

Na Obr. 1 je znázornené MRI zariadenie umiestnené v laboratóriu Fakulty baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií Technickej univerzity v Košiciach, ktoré je po spomínaných modifikáciách možné použiť ako SMES [1].



Obr. 1. MRI zariadenie s dewarovými nádobami na kvapalnú Hélium a budiacim zdrojom.
Fig. 1. MRI device with Dewar tanks for liquid helium and power supply.

SMES

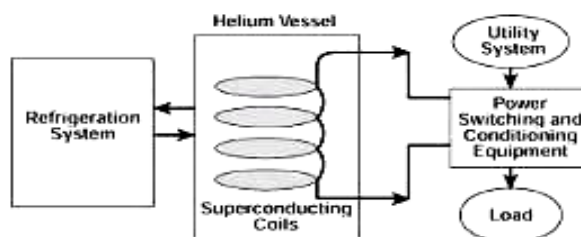
SMES systémy vo všeobecnosti pozostávajú zo 4 hlavných častí:

- supravodivý magnet,
- chladiaci systém,
- PCS (Power conditioning system),
- riadiaca jednotka.

¹ Ing. Peter Trojan, doc. Ing. Štefan Molokáč, PhD., Ing. Ladislav Grega, TU v Košiciach, F BERG, Ústav podnikania a managementu, Park Komenského 19, Košice

² prof. Ing. Pavol Rybár, PhD., TU v Košiciach, F BERG, Ústav geoturizmu, Park Komenského 19, Košice
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 3. 11. 2008)

Na Obr. 2 je znázornená jednoduchá bloková schéma SMES [3].



Obr. 2. Bloková schéma SMES [3].
Fig. 2. Block schematic diagram of SMES system [3].

Vinutie supravodivého magnetu je v bežných aplikáciách vyrobené zo zliatiny NbTi. Chladenie je v LTS (low temperature superconductivity) aplikáciách zabezpečené L_{He} (liquid He) a v HTS (high temperature superconductivity) aplikáciách L_N (liquid N). Energia uložená v supravodivom vinutí magnetu je daná vzťahom:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2,$$

kde: E - energia [W.s],
 L - indukčnosť vinutia [H],
 I - jednosmerný prúd [A].

Využitie SMES systémov je nasledovné:

- záložné zdroje elektrickej energie,
- úprava parametrov siete (napät'ové výkyvy, zmeny vo frekvencii).

Výhody SMES technológie sú:

- je ekologickým zdrojom,
- supravodivosť nespôsobuje žiadne nebezpečné chemické reakcie,
- neprodukuje toxické látky,
- vysoká účinnosť (cca 90 %),
- vysoká kapacita (závisí na magnete a požiadavkách záťaže),
- krátky nabíjací čas (niekoľko minút),
- veľmi rýchla odozva,
- vysoká životnosť systému,
- minimálne požiadavky na údržbu,
- relatívne nízke náklady (udržiavanie cievky v supravodivom stave).

Na druhej strane, medzi nevýhody SMES patria:

- vysoké investičné náklady kvôli supravodivému magnetu a PCS,
- krátky čas pokrytia (tzv. carryover time, závisí však od záťaže),
- potreba permanentného chladenia,
- problematika rozmerov systému v prípade veľkokapacitných zariadení SMES,
- problematika Lorentzových síl (riešením môže byť uloženie cievky v zemi),
- možný dopad na zdravie (systémy so silným magnetickým poľom).

Druhy SMES systémov

Rôzne SMES zariadenia využívajú ako základ ten istý princíp, ale majú rozdielne použitie. Vo všeobecnosti, rozdiely sú badateľné v množstve uschovanej elektrickej energie a v použití systému, preto je možné SMES systémy podľa týchto kritérií rozdeliť na:

- SMES veľkého rozsahu,
- Mikro-SMES,
- D-SMES (Distributed SMES).

Chladiaca hlava a jej oprava

Chladiaca hlava supravodivého magnetu je jeho dôležitou súčasťou. Zabezpečuje optimálnu prevádzku zariadenia a svojou činnosťou prispieva k zníženiu množstva odpareného He. Pri jej prípadnej poruche je dôsledkom znateľne zvýšený odpar He a po odparení celého množstva L_{He} nárast teploty kryostatu [2]. Príčiny poruchy chladiacej hlavy môžu byť rôzne, počínajúc jej opotrebovaním a končiac výpadkami elektrickej energie, resp. chladiacej vody nutnej pre beh kompresora chladiacej hlavy. Na obr. 3 je demontovaná chladiaca hlava zo supravodivého magnetu umiestneného v laboratóriu F BERG, pripravená na opravu z dôvodu jej poruchy.



Obr. 3. Chladiaca hlava.
Fig. 3. Cooling head.



Obr. 4. Proces prechladzovania pomocou automatickej riadiacej jednotky kvapalného dusíka.
Fig. 4. Overcool process with and automatic controlling unit of liquid nitrogen.

Po demontovaní chladiacej hlavy nastal intenzívny odpar He z kryostatu a po jeho úplnom odparení jeho teplota stúpala zo stabilizovaného stavu až na teplotu cca 180 K. Ako protiopatrenie voči tomuto stavu bola zvolená metóda privádzania L_N na pôvodné miesto tepelného kontaktu chladiacej hlavy a štítov magnetu. Na obr. 4. je znázornené dočasné chladenie štítov magnetu L_N pomocou automatizovaného zariadenia dávajúceho L_N podľa potreby.

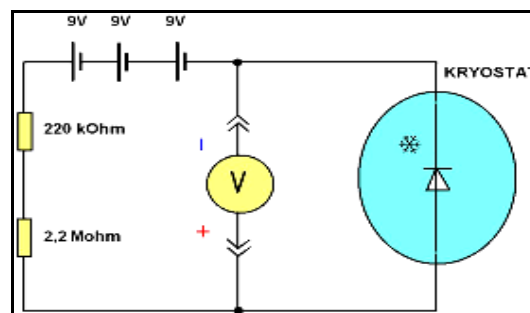
Meranie teploty

Pre meranie teplôt tepelných štítov supravodivého magnetu a ďalších parametrov je používaný tzv. monitor (Obr. 5), ktorý je súčasťou MRI zariadenia používaného v laboratóriu FBERG.

Tento prístroj dokáže zmerať hladinu He v kryostate, teplotu horného a spodného tepelného štítu, vonkajšiu teplotu, atď. Pre sledovanie skutočnej teploty vo vnútri kryostatu (teploty vinutia) však možnosti použitého monitora nestačia a je potrebné ju zistiť iným spôsobom. Pre meranie tejto teploty bol zostrojený (Obr. 8) a použitý prípravok podľa schémy (Obr. 6), ktorým boli zisťované napätia na svorkách tzv. spodnej a vrchnej diódy umiestnenej v tele kryostatu.

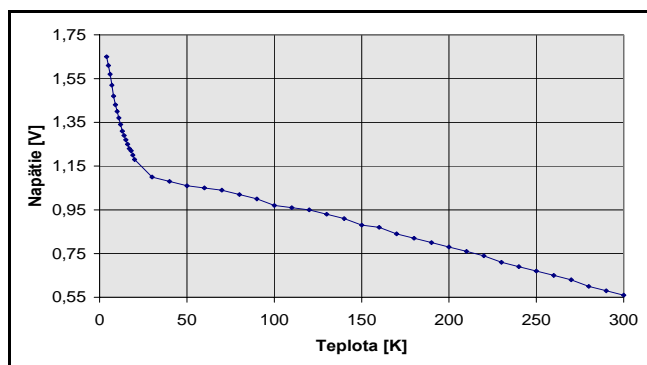


Obr. 5. Monitorovacie a meracie zariadenie.
Fig. 5. Monitoring and measuring device.



Obr. 6. Schéma prípravku na meranie vnútornej teploty kryostatu.
Fig. 6. Circuit diagram – for measuring of internal temperature in cryostat.

Tieto namerané napätia boli nakoniec prekonvertované na odpovedajúce hodnoty teplôt podľa konverzných tabuliek a boli zobrazené v grafickej forme na Obr. 7.



Obr. 7. Priebeh napätia na elektródach diód v závislosti od vnútornej teploty kryostatu.

Fig. 7. Voltage waveform of diode characteristics in connection with internal temperature in cryostat.



Obr. 8. Realizovaný prípravok na meranie vnútornej teploty kryostatu.

Fig. 8. Realised device for measurement of internal temperature in cryostat.

Predchladzovanie magnetu L_N

Aby bolo schladzovanie supravodivého magnetu čo najviac efektívne, optimálne je potrebné na prvotné predchladenie použiť L_N . Princíp predchladzovania L_N je takmer totožný so zalieváním L_{He} s tým rozdielom, že pred začatím zalievania L_{He} sú neprípustné akékoľvek zvyšky či už kvapalného alebo plynného N vo vnútri kryostatu. Z toho dôvodu sa predchladzovanie L_N robí iba po hranicu teploty cca 90 K. Na Obr. 9 je znázornený proces predchladzovania kryostatu L_N [2].



Obr. 9. Predchladzovanie magnetu tekutým N.
Fig. 9. Overcooling process of magnet by liquid nitrogen.

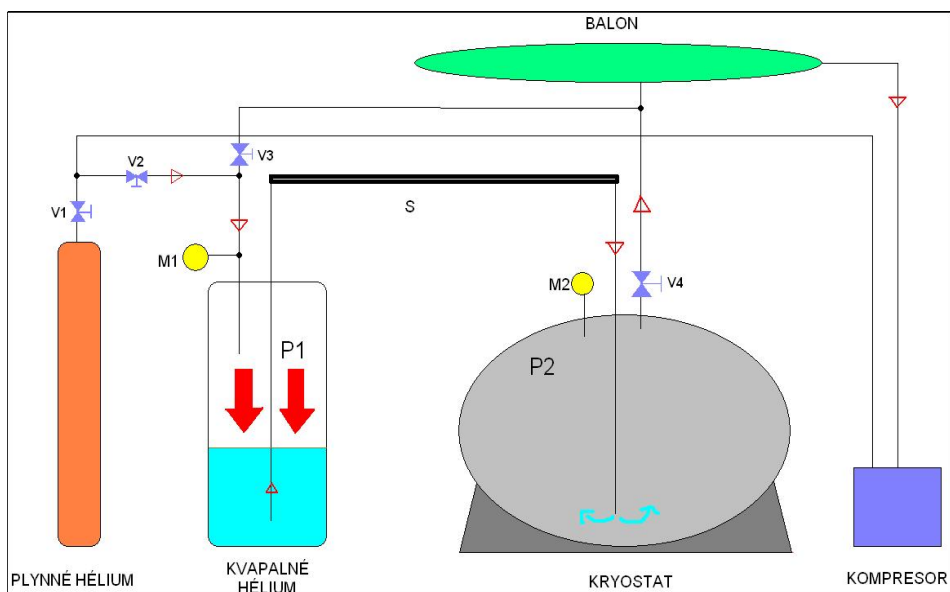


Obr. 10. Pozvoľné zalievanie magnetu tekutým He.
Fig. 10. Refilling of superconducting magnet with He.

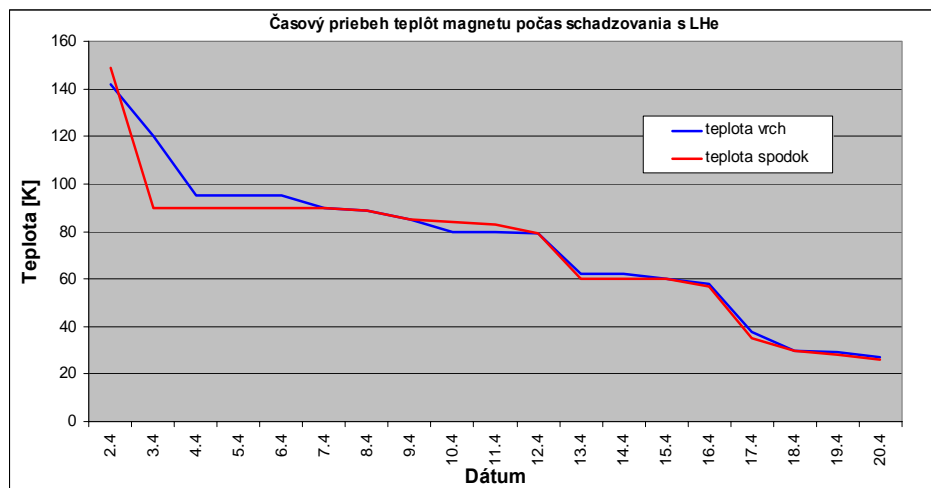
Schladzovanie magnetu L_{He}

Po vykonaní procedúry predchladenia magnetu L_N a jeho nasledovnom prečistení plynným He za účelom odstránenia zvyškov N, nasleduje procedúra pozvoľného schladzovania L_{He} , ktoré sa líši od klasického zalievania neporovnateľne menšou rýchlosťou privádzania L_{He} do kryostatu. Na Obr. 10. je znázornené pozvoľné schladzovanie magnetu z laboratória FBERG a na Obr. 11 je znázornená bloková schéma celého systému.

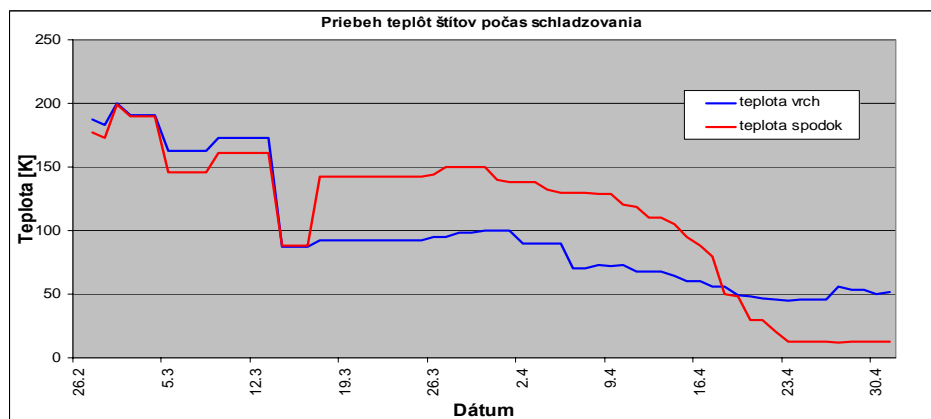
Počas celého schladzovania magnetu bola priebežne sledovaná teplota vyššie popísaným prípravkom. Po dosiahnutí teploty 4,2 K bol systém odstavený a stabilizovaný. Po tomto procese bolo už možné supravodivý magnet udržiavať v prevádzke obvyklým spôsobom a to bežným dopĺňaním L_{He} . Časový priebeh schladzovania supravodivého magnetu je na Obr. 12. Priebeh teplôt tepelných štítov počas schladzovania znázorňuje Obr. 13.



Obr. 11. Schéma zapojenia zalievacej aparatúry.
Fig. 11. Schematic diagram of refilling installation.



Obr. 12. Priebeh teplôt magnetu počas schladzovania pomocou L_{He} .
Fig. 12. Temperature waveforms of magnet during cooling process by L_{He} .



Obr. 13. Priebeh teplôt tepelných štítov počas schladzovania.
Fig. 13. Temperature waveforms of thermic shields during cooling process.

Optimalizácia procesu schladzovania

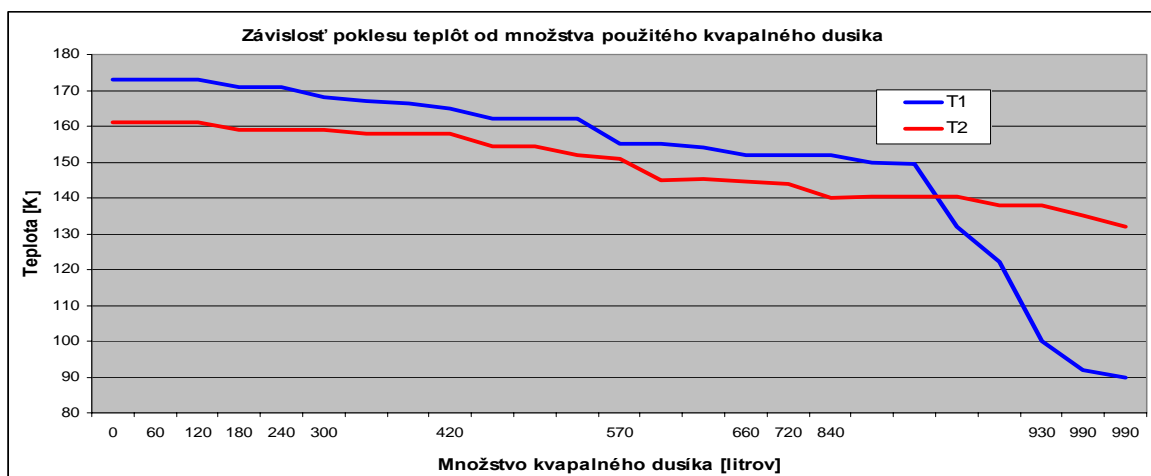
Schladzovanie veľkých supravodivých magnetov z izbovej teploty na teplotu, kedy sa stáva supravodič supravodivým, je veľmi zložitý proces ako z pohľadu ekonomického, tak aj z pohľadu technického. V prípade, že by sme prechladzovali kryostat obsahujúci experimentálne zariadenie z izbovej teploty priamo LHe, bola by spotreba značne vyššia ako v prípade, že by sme na prvotné prechladenie použili kvapalnú dusík, čím aj celý proces prechladzovania by bol značne neekonomicky [2].

Neekonomičnosť procesu spočíva vo výrazných cenových rozdieloch, liter L_{He} je približne 75x drahší ako liter L_{N_2} ako aj vo fyzikálnych vlastnostiach týchto dvoch kvapalín (výparné teplo, entalpia), z čoho vyplýva, že L_{N_2} poskytuje podstatne vyšší chladiaci výkon ako to isté množstvo L_{He} .

Na základe týchto skutočností je výhodné a z ekonomického hľadiska optimálne realizovať prvotné schladzovanie magnetu s použitím L_{N_2} a to len na teplotu približne 100 K, pretože pri nižšej teplote by mohol nastať problém s jeho odstránením. Zvyšky L_{N_2} v kryostate by pri následnom zalievaní s L_{He} vymrzli a tým by mohli poškodiť celé experimentálne zariadenie.

Ďalším dôležitým parametrom, ktorý ovplyvňuje optimálnosť zalievania je rýchlosť prečerpávania hélia z dewarovej nádoby do kryostatu [2].

Vysoká rýchlosť zalievania spôsobuje rozbúrenie hladiny kvapalného hélia v kryostate, čo má za následok podstatne vyšší odpar hélia do balónov a tým aj nižšiu efektivitu zalievania. Nižšia rýchlosť je zas veľmi časovo náročná. Dôležitým ukazovateľom efektivity zalievania je teplota odchádzajúcich plynov. Pre optimálne využitie výparného tepla a entalpie kvapalného hélia sa teplota odchádzajúcich plynov pohybuje v priemere od 220 do 230 K. Pre schladenie celého magnetu z izbovej teploty sme použili 990 litrov L_N a 1200 litrov L_{He} . Pokles teploty magnetu v závislosti od dodaného množstva kvapalného dusíka je na Obr. 14.



Obr. 14. Pokles teplôt T1 a T2 magnetu v závislosti od dodaného množstva kvapalného dusíka.
Fig. 14. Decrease of magnet temperature in connection with amount of liquid nitrogen volume.

Prepočet spotrebovaného L_{He} na schladenie magnetu z teploty 20 K na teplotu 10 K.

Pre výpočty sú potrebné nasledovné veličiny:

- H - entalpia,
- T_k - kritická teplota (teplota pri ktorej začína byť supravodič supravodivý),
- ρ - hustota kvapalného hélia,
- Q_v - energia potrebná pre schladenie vinutia magnetu,
- Q_o - energia potrebná pre schladenie nerezového obalu supravodivého magnetu,
- Q_c - celková energia potrebná pre schladenie celého systému,
- C - merná tepelná kapacita,
- M - hmotnosť,
- T - teplota,
- V - objem,
- M_{He} - hmotnosť kvapalného hélia.

Hélium:

- Bod varu 4,215 K
- T_k 5,2 K (0.226 MPa)
- ρ 125 kg.m⁻³
- Výparné teplo 23.5 kJ.kg⁻¹

Priebeh entalpie H kvapalného hélia v závislosti od teploty T vyjadruje funkcia:

$$y = 14.16 e^{0.2544 x}$$

Výpočet entalpie H kvapalného hélia:

$$\begin{aligned} H &= \int_{10}^{20} 14.161 e^{0.2544x} dx = [14.161 * \frac{1}{0.2544} e^{0.2544x}]_{10}^{20} = [55.66 e^{0.2544x}]_{10}^{20} = \\ &= 55.66(2.718^{5.088} - 2.718^{2.544}) = 55.66(161.97 - 12.727) = 8306.6 J.kg^{-1} \end{aligned}$$

Výpočet tepelnej energie pre schladenie NbTi vinutia:

$$\begin{aligned} Q_v &= C \cdot M \cdot T \quad [J] \\ Q_v &= 1,2 J.kg^{-1}.k^{-1} \cdot 3000kg \cdot 10 J \\ Q_v &= 36000 J \end{aligned}$$

Výpočet tepelnej energie pre schladenie nerezového obalu:

$$\begin{aligned} Q_o &= 9,5 J.kg^{-1}.k^{-1} \cdot 800kg \cdot 10 J \\ Q_o &= 76000 J \\ Q_c &= 36000J + 76000 J \\ Q_c &= 112000 J \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{he} &= \frac{Q}{V T + H} = \frac{112000}{23500 + 8306.6} = 3.52128 kg \\ V &= \frac{3.52128}{0.125} = 28.17025 Litrov \end{aligned}$$

Záver

Úschova energie je dôležitým procesom, v ktorom je kľúčovou otázkou výber technológie úschovy a celková účinnosť systému. SMES technológia ponúka možnosti úpravy parametrov elektrickej siete, ako aj samotnú úschovu elektrickej energie, a to v nezmenenej forme. Z hľadiska investícií sa použitie a modifikovanie vyradených MRI zariadení pre účely SMES javí byť výhodné. Dôležitým faktorom pri prevádzke takéhoto systému je optimalizácia jeho parametrov. Tu vystupujú do popredia hlavne náklady na údržbu zariadenia v schladenom a supravodivom stave. Pri údržbe MRI zariadenia v laboratóriu FBERG sa podarilo zistiť a osvojiť si techniky optimálneho chodu zariadenia, ktoré boli čiastočne popísané v tomto príspevku.

"Tento článok vznikol s podporou ministerstva školstva SR a firmy Linde".

Literatúra - References

- [1] Brechna, H.: Superconducting magnet systems. *Gebr. Parcus KG. München. 1973.*
- [2] Jelínek, Málek: Kryogenní technika. *SNTL. Praha. 1982.*
- [3] www.afrlhorizons.com (4 august 2007)