

# Szupravezetők, a mágneses tér hatása a szupravezetőkre

## I. Történeti áttekintés

1908 Onnes<sup>1</sup>: A hélium cseppfolyósítása (forráspontja  $T_{fHe} = 4,2$  K).  
Anyagi jellemzők vizsgálata a folyékony hélium hőmérsékletén.

1911 Onnes: A higany szupravezető tulajdonságának felfedezése.  
Nem szupravezető fémnél (pl. platina) 0 K közelében maradó ellenállás mérhető.  
1933 Meissner<sup>2</sup> és Ochsenfeld<sup>3</sup>: A Meissner-effektus felfedezése.

1986 Bednorz<sup>4</sup> és Müller<sup>5</sup>: A magashőmérsékletű szupravezetők felfedezése  $T_c > 30$  K.

1987 ittrium (Y) alapú szupravezetők  $T_c \sim 93$  K.  
 $T_c > 77$  K anyagoknál a hűtés folyékony nitrogénnel történhet a nagyon drága folyékony hélium helyett.  
A nitrogén forráspontja  $T_{fN} = 77,36$  K.

## II. Szupravezetők tulajdonságai

1. ellenállás-mentes áramvezetés
2. ideális diamágneses tulajdonság
  - a mágneses tér "kiszorul" a szupravezető anyagból – lebegtetés
  - a mágneses tér "befagy" a szupravezetőbe – szupravezető mágnes

Jellemző mennyiségek:  $T_c$ ,  $J_c$ , és  $B_c$ .

$J_c$ ,  $B_c$  a hőmérséklet emelkedésével csökken,

$J_c$  a külső mágneses térerősség növekedésével csökken.

Ha a  $T$  hőmérséklet,  $J$  áramsűrűség és  $B$  indukció közül bármelyik változó meghaladja az adott anyagra jellemző kritikus értéket, megszűnik a szupravezető állapot, az anyag normál állapotba kerül.

### I. típusú szupravezetők

- normál (rezisztív) állapot
- szupravezető állapot

### II. típusú szupravezetők

A II. típusú szupravezetők általában fémes vegyületek. A legfontosabb különbség az I. és a II. típusú szupravezetők között a mágneses viselkedésük. Ellentétben az I. típusú szupravezetőkkel, a II. típusú szupravezető esetében két kritikus mágneses indukció értéket ( $B_{c1}$ ,  $B_{c2}$ ) különböz-

---

<sup>1</sup> Onnes, Heike Kammerlingh holland fizikus, Nobel-díjas (1853. IX. 21. – 1926. II. 21.)

<sup>2</sup> Meissner (Meißner), Fritz Walther német fizikus (1882. XII. 16. - 1974. XI. 16.)

<sup>3</sup> Ochsenfeld, Robert német fizikus (1901. V. 18. - 1993. XII. 5.)

<sup>4</sup> Bednorz, Johannes Georg német fizikus, Nobel-díjas (1950. V. 16. - )

<sup>5</sup> Müller, Karl Alexander svájci fizikus, Nobel-díjas (1927. IV. 20. - )

tünk meg.  $B_{c1}$  alatt a szupravezető teljesen kiszorítja a mágneses mezőt magából (diamágnesesség). Ha a mágneses indukció nagysága  $B_{c1} < B < B_{c2}$  között van, a szupravezető kevert állapotba kerül, a külső mező ugyan behatol a szupravezetőbe, de annak ellenállása még nem tér vissza, az csak  $B > B_{c2}$  indukciónál történik meg.

### *Meissner hatás*

A szupravezetőt mágneses térbe helyezve a tér csak bizonyos mélységig hatol be az anyagba, a szupravezető belseje felé a tér exponenciálisan csökken. A mágneses tér növelésével a behatolási mélység nő.

### *A II. típusú szupravezető anyagok mágneses tulajdonságai*

#### Az indukció növelésének hatása

Kis mágneses terek ( $B < B_{c1}$ ) esetén a fluxus kiszorul a szupravezető állapotban lévő anyag belsejéből (fluxus kiszorítás),  $B_{c1}$  – alsó kritikus indukció.

Nagyobb mágneses tereknél a fluxus részlegesen hatol be a szupravezető belsejébe (fluxus behatolás) és az erővonalak az ott lévő rácshibákon rögzülnek (fluxus rögzítődés).

Az ilyen módon rögzített fluxus a mágneses tér változtatásával - a mágneses tér és a szupravezető áramának kölcsönhatásaként - létrejövő erőhatással elmozdítható.

Az indukció felső kritikus értékénél ( $B_{c2}$  több T nagyságú is lehet) a szupravezető normál állapotba kerül.

Egy állandó mágneset szupravezetőhöz közelítve  $B < B_{c1}$  indukciónál teljes fluxus kiszorítás van (diamágneses) – taszítóerő lép fel.

Az állandó mágnes további közelítésével  $B > B_{c1}$  értéknél a fluxus fokozatosan behatol a szupravezető anyag belsejébe.

Ennek az állapotnak az egyszerűsített modellje szerint a fluxusvonalak mentén az anyag normál állapotú, a fluxusvonalak között szupravezető állapotú.

A fluxust egy rögzítő erő köti az anyag rácshibáihoz, amely erő az előállítási technológiától függ és tervezhető.

#### Az áramsűrűség növelésének hatása

A  $J_c$  kritikus áramsűrűség elérésekor az anyag normál állapotba kerül. Minél nagyobb a rögzítő erő annál nagyobb a kritikus áramsűrűség.

A rögzítődés a fluxus növelését is és csökkentését is akadályozza, a szupravezető anyag a részleges behatolás tartományában is diamágnesként viselkedik.

A szupravezető mágnesezettsége a mágneses tér növelésével a teljes behatolásig nő, amikor a mágneses tér a teljes keresztmetszetben jelen van.

#### Teljes behatolás után

Az állandó mágneset a szupravezetőtől távolítva, a külső mágneses tér csökkenésekor az anyag belsejében a mágneses tér nem változik, a szupravezető az állandó mágnes felé vonzóerőt fejt ki.

A külső mágneses tér nullára csökkenése után a szupravezetőben maradó mágneses teret befagyott mágnesezettségnek nevezik.

A teljes átmágnesezési ciklus hiszterézises (mint a ferromágneses anyagoknál).

*A szupravezetők felmágnesezése és hűtési módok*

- ZFC (zero field cooled) módszer – hűtés mágneses tér mentes környezetben, felmágnesezés állandó mágnessel vagy impulzus üzemben gerjesztett mágnessel. Néhány T nagyságú teret lehet létrehozni a szupravezetőben.

- FC (field cooled) módszer – hűtés állandó mágneses térben. Stabilabb, de így csak kisebb teret lehet létrehozni, az impulzus üzem nem járható.

A szupravezető "emlékszik" a hűtési folyamatnál, az átmenetkor alkalmazott mágneses térre.

A hűtés teljesítményigénye (1 W hőteljesítmény szobahőmérsékletű környezetbe történő elvezetéséhez szükséges teljesítmény-szükséglet)

4,2 K hőmérsékleten 1 kW,

77 K hőmérsékleten 20 W.

Nagy teljesítményeken a hűtéshez szükséges energia részaránya kicsi a veszteségi energiához képest.

### III. Szupravezető anyagok

*Alacsony hőmérsékletű szupravezetők (AHS) – Low Temperature Superconductors (LTS)*

$T_c < 30$  K.

A hűtőközeg folyékony hélium.

NbTi ( $T_c = 8-10$  K), Nb<sub>3</sub>Sn ( $T_c = 22,5$  K),

$B_c \approx 9-12$  T,  $J_c \approx 100$  A/mm<sup>2</sup>.

*Közepes hőmérsékletű szupravezetők (KHS) – Medium Temperature Superconductors (MTS)*

Magnéziumdiborid MgB<sub>2</sub> ( $T_c = 39$  K).

*Magashőmérsékletű szupravezetők (MHS) – High Temperature Superconductors (HTS)*

$T_c = 90-110$  K.

(Hg alapú anyaggal végzett kísérletnél 164 K)

A hűtőközeg folyékony nitrogén is lehet.

Y<sub>1</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO 123)

Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (BSCCO 2223)

$B_c = 100$  T,  $J_c = 500$  A/mm<sup>2</sup>, ha  $T \rightarrow 0$ .

### IV Szupravezető alkalmazások

#### 1. Zárlatkorlátozó (ZÁK)

Követelmények:

Az áramot a független zárlati értékről a hálózatvédelem készülékeinek, berendezéseinek megszakítóképesége alá kell csökkenteni, korlátozni. Követelmények:

- üzemi áramnál kis impedancia,
- zárlati áramnál nagy impedancia,
- gyors működés (az első áramcsúcs korlátozása),
- a hálózat helyreállása után gyors visszatérés szupravezető állapotba.

### 1.1 Rezisztív szupravezetős zárlatkorlátozó

Sorosan beiktatott elem. Üzemi áramnál szupravezető állapot,  $R \sim 0$ , zárlati áramnál  $J > J_c$ , ezért kiesik, normál állapotúvá válik, megnöveli a hálózati impedanciát.

Össze kell hangolni a hálózat többi védelmi elemével (megszakító képesség, túlterhelhetőség).

A zárlat megszűnte után visszaáll a szupravezető állapot.

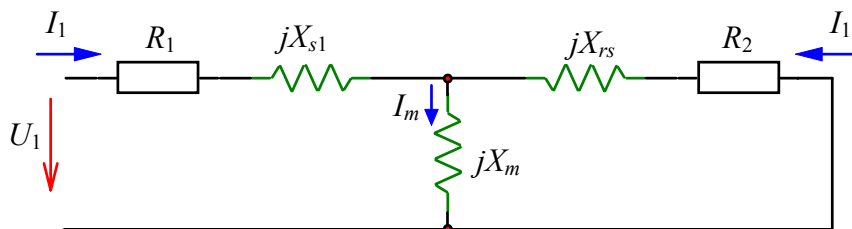
*Problémák:*

- átfolyik rajta a teljes áram, a zárlati is,
- a normál állapotba való átmenet nem homogén, emiatt egyenlőtlen a túlmelegedése, ami gátolja a visszatérést és károsodást is okozhat,
- váltakozó áramnál hiszterézis veszteség keletkezik,
- a jó minőségű kerámia-fém csatlakozás kialakítása körülményes,
- erősen induktív hálózatnál nem érvényesül a korlátozó hatás.

### 1.2 Induktív szupravezetős zárlatkorlátozó

Induktív csatolású, egymással mágneses kapcsolatban levő fém (Cu, Al) tekercs és szupravezető gyűrű(k)ből áll. Tulajdonképpen egy szekunder oldalon rövidrezárt transzformátor.

Üzemi áramnál az MHS gyűrű szupravezető állapotban van, árama ellensúlyozza a primer tekercs gerjesztését (ezért az áthidaló – főmező – ág  $I_m$  árama közel zérus).



*A transzformátor egyszerűsített áramköri vázlatja*

Zárlati áramnál,  $J > J_c$  elérésekor a szekunder "tekercs" normál (rezisztív) állapotba kerül, árama lecsökken  $I_2 \ll I_1$ , nem képes ellensúlyozni a primer tekercs áramnövekedés miatt megnövekedett gerjesztését, az  $I_m$  áram megnő, az áthidaló ág telítődhet is.

*Előnyei a rezisztív változathoz képest:*

- nincs galvanikus kapcsolat a szupravezető anyaggal,
- a szupravezető anyagban nem folyik át a teljes áram, a zárlatnál az áram csökken,
- a primer oldali menetszámmal (a menetszám áttétellel) bármilyen megszólalási áram beállítható.

Üzemi áramnál a ZÁK rövidzárásban van,  $Z_{rz} \sim X_{s1} + X_{s2}$ , zárlati áramnál közel üresjárásba kerül,  $Z_0 \sim X_m$ . A szórási reaktancia és a főmező reaktancia megfelelő geometriai kialakítással a szükséges értékre tervezhető.

## 2. Szupravezetős mágneses energiatároló (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage)

Alkalmazás: a hálózati zavarok áthidalásására 1-2 s időtartamig.

Folyékony héliummal 4,2 K hőmérsékletre lehűtött NbTi tekercsben állandó egyenáram folyik, a

tárolt mágneses energia:  $W_{mag} = \frac{1}{2} LI^2$ .

A tárolt energiát a hálózati feszültség letörése esetén használják fel.

*Jellemzői:*

- kis reakcióidő,
- több MW teljesítmény tárolható,
- biztonságos működésű, nem környezetszennyező,
- nem tartalmaz mozgó alkatrészt,
- a hálózati zavarok gyakorisága, száma és mértéke nem befolyásolja az élettartamot.

*3. Szupravezetős lendkerekes kinetikai energiatároló*

Alkalmazás: feszültség letörések áthidalása 15-120 s időtartamig, a dízelaggregátok belépéséig.

A forgó tömeg kinetikai energiája:  $W_{kin} = \frac{1}{2} \Theta \omega^2$ ,  $n=50,000$  fordulat/perc (vagy több) is lehet.

A mechanikai (súrlódási) veszteségek csökkentése érdekében mágnesesen lebegtetett szupravezetős csapágyazással készítik.

A lendkerék felgyorsítása (a tároló feltöltése) és a veszteségek pótlása villamos motorral történik, az energia visszanyerés (a tároló kisütése) generátorral és teljesítményelektronikai átalakítóval. A motor és a generátor lehet azonos egység és a lendítő tömeg lehet a motor/generátor forgórésze is.

*Jellemzői:*

- nem érzékeny a töltés/kisütés ciklusok számára és gyakoriságára,
- nem érzékeny a kisütés mélységére,
- üzeme nem függ jelentősen a környezeti hőmérséklet változásától,
- hosszú élettartamú,
- egyszerűen felügyelhető (távolról is),
- környezetbarát,
- nagy energiasűrűségű,
- megbízható működésű.

A szupravezetős lebegtetett csapágyazásnak az a jelentősége, hogy nagy mértékben csökkenthető (vagy ki is küszöbölhető) a stand-by üresjárási (súrlódási) veszteség. Maga a lebegtetett csapágy nem kopik, stabil, a veszteséget a hűtés energiaigénye jelenti.

A motor és a generátor ugyanaz a gép is lehet:

- állandó mágneses szinkrongép (vasmentes kivitelben nincs vasvesztesége, ami egyébként az üresjárási veszteség domináns része),
- reluktancia gép (üresjárásban nincs vasvesztesége).

*A tárolóképesség jóságának jellemzésére használt mutatók:*

- üresjárási veszteség – beleértve a szupravezetők hűtőteliességét,
- leadható/felvett teljesítmény aránya (hatásfok),
- tárolási veszteség a névleges tárolt energiára vonatkoztatva (hagyományos tárolónál: 1-2 %/óra, szupravezetősénél: 0,1 %/óra).

A csapágy  $\mu_s$  súrlódási tényezője (a mozgást akadályozó erő és a súrlódó felületeket összeszorító erő hányadosa):

- golyós csapágnál  $\mu_s=10^{-3}$ ,
- elektromágneses csapágnál  $\mu_s=10^{-4}$ ,
- MHS csapágnál  $\mu_s=10^{-9}$ . Itt az ekvivalens súrlódási tényező (ha nitrogén hűtés teljesítményét veszteségként számítjuk)  $\mu_s=2 \cdot 10^{-6}$ .

#### 4. Villamos forgógépek

egyenáramú (gerjesztés) - homopoláris, szinkron (gerjesztés).

AHS alkalmazásakor  $J_c$  néhány kA/mm<sup>2</sup>

MHS alkalmazásakor  $J_c$  néhány 0,1 kA/mm<sup>2</sup>

Mivel a légrésindukció nagyobb, mint a hagyományos vagy az állandó mágneses gépekben, a vas telítődne, ezért vasmentes kialakítást készítenek.

Légréstekerceslésnél a vezetők száma nagyobb, mert a fogak helyére is vezetők kerülnek, ezért nagyobb állórész kerületi áramsűrűség és nagyobb egységteljesítmény érhető el.

A szigeteléssel szembeni követelmények is változnak. Mivel hiányzik a földelt vastest, a kapcsoló feszültség növelhető, generátornál elhagyható a kimeneti transzformátor.

MHS anyagú gépeknél is alkalmaznak folyékony héliumot a nagyobb áramsűrűség és nagyobb termikus stabilitás érdekében.

Elérhető, hogy néhány K helyett több 10 K legyen a tartalék, ezzel javuljon a túlterhelhetőség.

#### A témához kapcsolódó irodalom:

1. Semperger, S., Városi, I., Vajda, I.: Szupravezetés zárlati áramkorlátozók. Elektrotechnika 1999. 92. évfolyam 3. szám, 131-134 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/1999/ET\\_1999\\_03t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/1999/ET_1999_03t.pdf)

2. Vajda, I., Szalay, A., Porjesz, T.: Szupravezetők az erősáramú iparban: Helyzet- és jövőkép. Elektrotechnika 2000. 93. évfolyam 7-8. szám, 279-281 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2000/ET\\_2000\\_07-08t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2000/ET_2000_07-08t.pdf)

3. Schöttler, R., Papst, G., Vajda, I.: Az ipari energia minőségének javítása szupravezetős energiatárolókkal. Elektrotechnika 2000. 93. évfolyam 9. szám, 333-336 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2000/ET\\_2000\\_09t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2000/ET_2000_09t.pdf)

4. Sokolovsky, V., Meerovich, V., Semperger, S., Vajda, I.: Magashőmérsékletű szupravezetős zárlati áramkorlátozók. Elektrotechnika 2000. 93. évfolyam 10. szám, 364-367 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2000/ET\\_2000\\_10t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2000/ET_2000_10t.pdf)

5. Vajda, I., Györe, A.: Szupravezetős lendkerekes energiatárolók. Elektrotechnika 2000. 93. évfolyam 11. szám, 431-436 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2000/ET\\_2000\\_11t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2000/ET_2000_11t.pdf)

6. Habisreuther, T., Kovalev, L., Kohári, Z., Vajda, I.: Szupravezetős Villamos Gépek. Elektrotechnika 2001. 94. évfolyam 2. szám, 63-69 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2001/ET\\_2001\\_02t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2001/ET_2001_02t.pdf)

7. Semperger, S., Vajda, I.: Testing the Operation of High Tc Superconducting Fault Current Limiter in a Real System. Periodica Polytechnica-Electrical Engineering 45/3-4 (2001), 265-276.

[http://www.pp.bme.hu/ee/2001\\_3/pdf/ee2001\\_3\\_09.pdf](http://www.pp.bme.hu/ee/2001_3/pdf/ee2001_3_09.pdf)

8. Vajda, I., Kohári, Z.: Szupravezetők a villamos gépekben. Elektrotechnika 2003. 96. évfolyam 9. szám, 234-240 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2003/ET\\_2003\\_09t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2003/ET_2003_09t.pdf)

9. Zádor, I., Farkas, L.: Aktív és passzív mágneses vasúti lebegtetések különleges megoldásai. 1. rész. Elektrotechnika 2004. 97. évfolyam 5. szám, 156-159 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2004/ET\\_2004\\_05t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2004/ET_2004_05t.pdf)

10. Zádor, I., Farkas, L.: Aktív és passzív mágneses vasúti lebegtetések különleges megoldásai. 2. rész. Elektrotechnika 2004. 97. évfolyam 6. szám, 179-181 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2004/ET\\_2004\\_06t.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2004/ET_2004_06t.pdf)

11. Györe, A., Péter, G., Vajda, I.: System Investigation of High Temperature Superconducting Self-limiting Transformer. 2006 J. Phys.: Conf. Ser. 43 966-970.

[http://www.iop.org/EJ/article/1742-6596/43/1/236/jpconf6\\_43\\_236.pdf](http://www.iop.org/EJ/article/1742-6596/43/1/236/jpconf6_43_236.pdf)

12. Györe A.: Szupravezetős zárlatiáram-korlátozók és szupravezetős önkorlátozó transzformátor tesztelése a felhasznált szupravezető gyűrű szempontjából. Elektrotechnika 2008. 101. évfolyam 9. szám, 11-14 o.

[http://www.mee.hu/files/ET/2008/ET\\_2008\\_09.pdf](http://www.mee.hu/files/ET/2008/ET_2008_09.pdf)

Összeállította: Kádár István

2012. március

### **Ellenőrző kérdések**

1. Mely mennyiségek kritikusak a szupravezető állapot szempontjából?
2. Milyen közeget használnak a szupravezetők hűtéséhez?
3. Milyen eljárás alkalmazható a szupravezetők felmágnesezésére?
4. Hogyan működik az induktív szupravezetős zárlatkorlátozó névleges üzemi áramnál?
5. Hogyan működik az induktív szupravezetős zárlatkorlátozó zárlati áramnál?
6. A szupravezetős villamos forgógépek konstrukciós sajátosságai.
7. A szupravezetős villamos forgógépek energetikai sajátosságai.