

# Szupravezetők, a mágneses tér hatása a szupravezetőkre

## I. Történeti áttekintés

- 1908 Onnes<sup>1</sup>: A hélium cseppfolyósítása (forráspontja  $T_{He} = 4,2$  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.

Alkalmazott hűtőfolyadékok:

| hűtőanyag  | forráspont $T_f$ (K) |
|------------|----------------------|
| hélium He  | 4,2                  |
| neon Ne    | 24,5                 |
| hidrogén H | 33                   |
| nitrogén N | 77,36                |

## II. Szupravezetők tulajdonságai

1. ellenállás-mentes áramvezetés
2. ideális diamágneses tulajdonság

- a mágneses tér „kiszorul” a szupravezető anyagból – alkalmazás: lebegtetés
- a mágneses tér „befagy” a szupravezetőbe – alkalmazás: szupravezető mágnes

A szupravezetőkre jellemző mennyiségek:  $T_c$  – kritikus hőmérséklet,  $J_c$  – kritikus áramsűrűség,  $B_c$  – kritikus indukció vagy  $H_c$  – kritikus térerősség.

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

$J_c$  a külső mágneses térerősség növekedésével is 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.

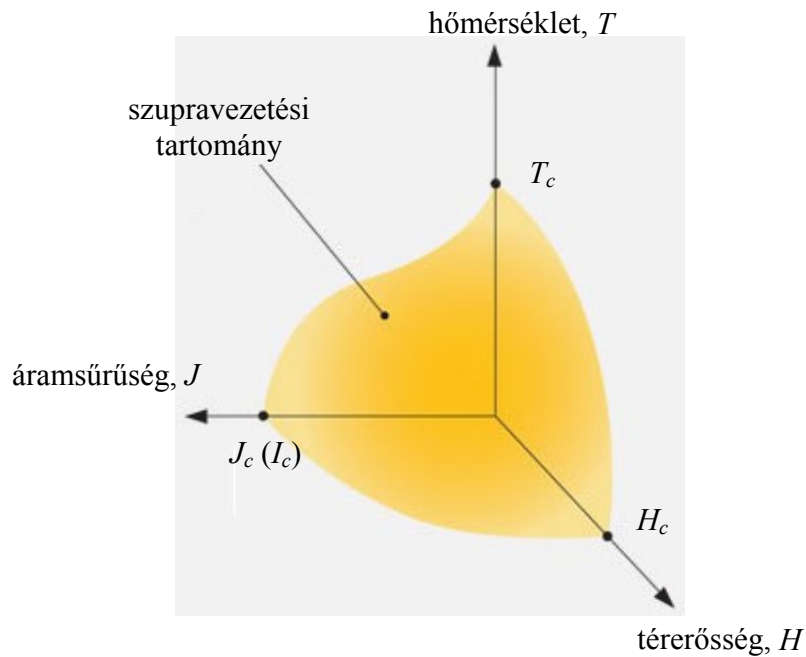
<sup>1</sup> Onnes, Heike Kammerlingh holland fizikus, Nobel-díjas (1853. IX. 21. – 1926. II. 21.)

<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.)

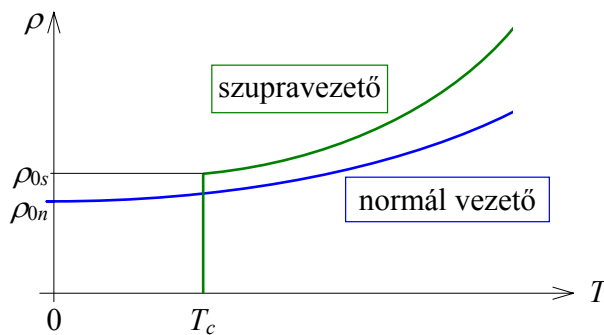
<sup>4</sup> Bednorz, Johannes Georg német fizikus, Nobel-díjas (1950. V. 16. - )

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



A szupravezető állapot kritikus felülete

A szupravezetők fajlagos ellenállása normál állapotban nagyobb, mint a jó vezetőké (például a rézé)



A fajlagos ellenállás változása a hőmérséklet függvényében

A nem szupravezető anyagok fajlagos ellenállásának hőmérséklet függése közelítőleg:

$$\rho_n = \rho_{0n} + a_n T, \quad a_n \neq \text{áll.}$$

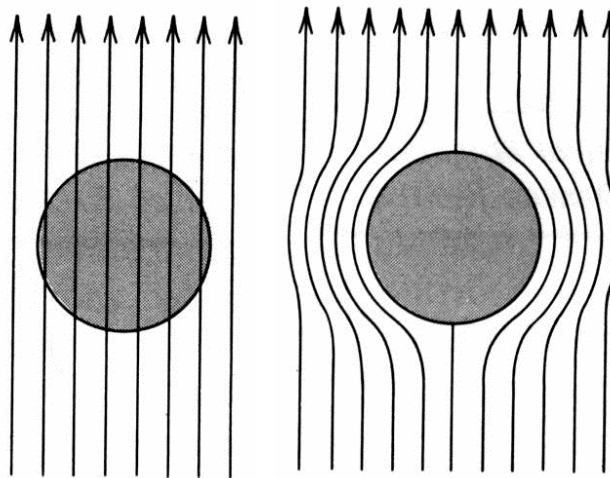
szupravezető anyagoknál:

$$\rho_s = \rho_{0s} + a_s T \text{ ha } T > T_c, \quad a_s \neq \text{áll.}$$

$$\rho_s = 0 \text{ ha } T < T_c.$$

Diamágneses anyagoknál az atomi elektronpályákban a külső mágneses tér hatására bekövetkező változások (a Lenz törvénnyel összhangban) a külső fluxust csökkentik, a mágnesezettség a külső térrel ellentétes irányú. Jóllehet minden anyag diamágneses, de ezt a gyenge hatást elrejtheti egy

másik, erősebb mágneses (pl. ferromágneses) tulajdonság. A diamágneses anyagban gyenge negatív szuszceptibilitás és egynél valamivel kisebb relatív permeabilitás lép fel.



A diamágnesség illusztrációja  
normál fém                      szupravezető

### *I. típusú szupravezetők*

Két vezetési állapotuk van:

- normál (rezisztív) állapot
- szupravezető állapot

### *II. típusú szupravezetők*

Három vezetési állapotuk van:

A II. típusú szupravezetők általában fémes vegyületek. A legfontosabb különbség az I. és a II. típusú szupravezetők között a mágneses viselkedésükkel kapcsolatos. Ellentétben az I. típusú szupravezetőkkel, a II. típusú szupravezető esetében két kritikus mágneses indukció értéket ( $B_{c1}$ ,  $B_{c2}$ ) különböztetünk meg.  $B_{c1}$  alatt a szupravezető teljesen kiszorítja a mágneses mezőt magából (diamágneses). Ha a mágneses indukció nagysága  $B_{c1}$  és  $B_{c2}$  között van ( $B_{c1} < B < B_{c2}$ ), 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. (Ez a jelenség nem azonos a váltakozó mágneses tér kapcsán a fémeknél áttekintett behatolási mélységgel.)

### *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.

A mágneses tér növekedésével a fluxus részlegesen behatol a kevert állapotú szupravezető belsejébe (fluxus behatolás) és az erővonalak az ott lévő rácshibákon rögzülnek (fluxus rögzítődés), ami lényegében kijelöli a fluxuscsatornát.

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

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

A kevert állapot egyik egyszerűsített modellje szerint a fluxusvonalak mentén az anyag normál állapotú, a fluxusvonalak között pedig szupravezető állapotú.

A fluxust egy rögzítő erő az anyag rácshibáihoz köti, 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.

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

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

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 további növelésével a teljes behatolásig nő, amikor a mágneses tér már a teljes keresztmetszetben jelen van.

Teljes behatolás után

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

A külső mágneses tér nullára csökkenése, az állandó mágnes teljes eltávolítása után a szupravezetőben maradó mágneses teret befagyott mágnesezettségnek nevezik.

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

*A szupravezetők felmágnesezése és hűtési módok*

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

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

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

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

- 4,2 K hőmérsékleten 1 kW,

- 77 K hőmérsékleten 20 W.

Nagy teljesítményeken a szupravezető hűtéséhez szükséges energia részaránya kicsi a nemszupravezetőben keletkező veszteségi energiához képest.

Például:

20 T indukció előállításának teljesítményigénye réz tekerccsel: 20 MW,  
szupravezetővel: < 1 kW.

### III. Szupravezető anyagok

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

$T_c < 30$  K.

A hűtőközeg folyékony hélium.

Neobium-titán NbTi ( $T_c = 8-10$  K), neobium-ón 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)*

$T_c = 30-90$  K.

Magnéziumdiborid MgB<sub>2</sub> ( $T_c = 39$  K),  $B_c \approx 14$  T,  $J_c \approx 100-1000$  A/mm<sup>2</sup> az indukciótól függően.

*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.

Ittrium-bárium-réz-oxid Y<sub>1</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO 123)

Bizmut-stroncium-kalcium-réz-oxid 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> is lehet, ha  $T \rightarrow 0$ .

### IV Szupravezető alkalmazások

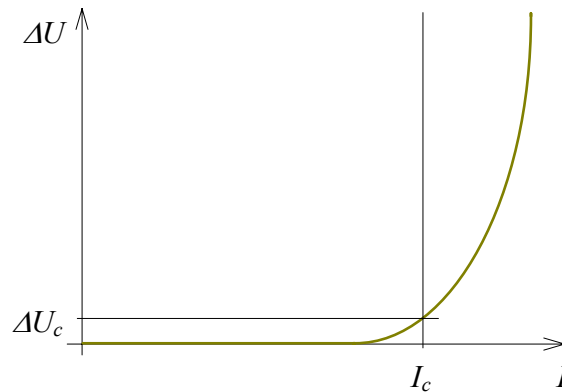
#### 1. Zárlatkorlátozó (ZÁK)

Feladat: az áramot a független zárlati értékről – ami a névleges érték 5-20 szorosa is lehet – a hálózatvédelem készülékeinek, berendezéseinek megszakítóképessége alá kell csökkenteni, korlátozni. Minél gyorsabban működik a zárlati áram korlátozás, annál kisebb mértékben kell meg növelni a beépített készülék megszakítóképességét, ami jelentős beruházási költségcsökkentést jelent.

Követelmények:

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

Magashőmérsékletű szupravezetőknél gyakran értelmezik az  $I_c$  kritikus áramot, amelynél a  $\Delta U$  fajlagos feszültségesés eléri az 1  $\mu$ V/cm értéket.



A kritikus áram értelmezése MHS anyagoknál

### 1.1 Rezisztív szupravezetős zárlatkorlátozó

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

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

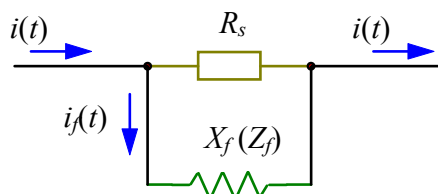
A zárlat megszűnte után visszaáll a szupravezető állapot.

*Problémák:*

- átfolyik rajta a teljes áram, így a zárlati is,
- a normál állapotba való átmenet nem homogén, emiatt az átmenet alatt egyenlőtlen a szupravezető anyag áramsűrűsége és a túlmelegedése, ami gátolja a visszatérést és károsodást is okozhat,
- váltakozó áramnál hiszterézis veszteség keletkezik,
- a szupravezetős korlátozó áramkörbe iktatásánál szükséges jó minőségű kerámia-fém csatlakozás kialakítása körülményes,
- erősen induktív hálózatnál nem érvényesül megfelelően a korlátozó hatás.

### 1.2 Rezisztív szupravezetős zárlatkorlátozó párhuzamos fojtótekerccsel

A normál működés során (névleges üzemi viszonyok között) a teljes  $i$  áram az  $R_s$  szupravezető ellenálláson folyik. Meghibásodásnál az áram növekszik és a szupravezető normál állapotba kerül, aminek következtében az áram döntő része  $i_f$  a nagy  $X_f$  reaktanciájú fojtón fog folyni, mivel a szupravezető normál állapotú ellenállása lényegesen nagyobb a fojtó reaktanciájánál. (A fojtótekerccs nem elhanyagolható ellenállása esetén helyesebb a  $Z_f$  impedanciáról beszélni.)



Szupravezetővel párhuzamos fojtótekerccs

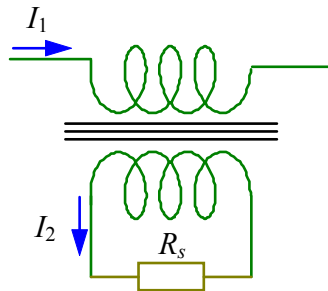
Ezzel a megoldással elérhető a zárlati áram korlátozása 1 perióduson belül.

Az átbillenés során keletkező hőmennyiséget el kell vezetni a szupravezetőből, ennek hatékonyságától függ a szupravezető állapot helyreállításához szükséges idő.

Ennél a megoldásnál kisebb áram folyik át a szupravezetőn, mint tisztán rezisztív esetben.

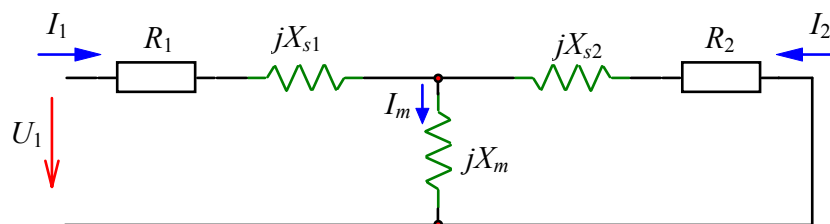
### 1.3 Induktív szupravezetős zárlatkorlátozó

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



*Az induktív szupravezetős zárlatkorlátozó elve*

Üzemi áramnál az MHS gyűrű szupravezető állapotban van ( $R_s=0$ ), áramával ellensúlyozza a primer tekercs gerjesztését, ezért az áthidaló – fővező – ág  $I_m$  árama közel zérus,  $|I_2| \sim |I_1|$ .



*A transzformátor egyszerűsített áramköri vázlata*

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, a nagy  $X_m$  reaktanciájú áthidaló ág „belép” az áramkörbe.

*Előnyei a rezisztív változathoz képest:*

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

Üzemi áramnál a ZÁK rövidzárásban van, a zárlati impedancia  $Z_{rz} \sim X_{s1} + X_{s2}$ , míg zárlati áramnál közel üresjárásba kerül, az üresjárás impedancia  $Z_0 \sim X_m$  (amennyiben  $R_1$  elhanyagolható a reaktanciák mellett). Az  $X_s$  szórás reaktancia és az  $X_m$  fővező reaktancia megfelelő geometriai kialakítással a szükséges értékre tervezhető  $X_m \gg X_s$ .

## 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:  $W_m=0,5LI^2$ .

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:  $W_{kin}=0,5\Theta\omega^2$ , a fordulatszám  $n=50,000$  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 (távrolól 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 csak a hűtés energiaigénye jelenti.

A motor és a generátor ugyanaz a gép is lehet:

- állandó mágneses szinkrongép (vasmentes kivitelben nincs vasvesztesége, ami a normál kivitelű gépeknél 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 (tárolási hatásfok),
- tárolási veszteség a névleges tárolt energiára vonatkoztatva (hagyományos tárolónál: 1-2 %/óra, szupravezetősnél: 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 csapágynál  $\mu_s=10^{-4}$ ,
- MHS csapágynál  $\mu_s=10^{-9}$ . Itt az ekvivalens sűrűlási tényező (ha a nitrogén hűtés teljesítményét veszteségként számítjuk)  $\mu_s=2 \cdot 10^{-6}$ .

#### 4. Villamos forgógépek

homopoláris egyenáramú gép – szupravezetős gerjesztés,  
szinkron gép – szupravezetős gerjesztés.

AHS alkalmazásakor elérhető áramsűrűség  $J_c$  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, ezért vasmentes kialakítással készítik, a vasmag telítődne.

Légréstekercselésnél a vezetők száma nagyobb, mint vasmagosnál, mert a fogak helyére is vezetők kerülnek, ennek eredményeként nagyobb állórész kerületi áramsűrűség, nagyobb feszültség és nagyobb egységteljesítmény érhető el.

A szigeteléssel szembeni követelmények is változnak. Mivel hiányzik a földelt vastest, a kapcsolófeszültség növelhető, generátornál akár el is hagyható a kimeneti transzformátor.

MHS anyagú gépeknél is alkalmaznak folyékony héliumot (zárt rendszerben) a nagyobb áramsűrűség és a nagyobb termikus stabilitás (hőmérsékleti tartalék) érdekében.

Elérhető, hogy néhány K helyett több 10 K legyen a tartalék ( $T_c-T_f$ ), ezzel javuljon a túlterhelhetőség.

#### 5. További alkalmazások

- MRI (Magnetic Resonance Imaging) – orvosi diagnosztikában, zárt kialakításnál 1-3 T, nyitottnál 0,3 T indukció, NbTi ( $T_c=9$  K) vagy MgB<sub>2</sub> szupravezetővel,
- PET (Positron Emission Tomography) – orvosi tomográfia, daganat terápia, Nb<sub>3</sub>Sn szupravezetővel,
- MagLev train, Japán – mágnesesen lebegtetett vasút, szupravezetős tekercselt mágnesekkel,
- Yamanashi teszt pálya (a Tokyo-Osaka vonal egy 33 km hosszú szakaszán) –  $v>500$  km/h,
- ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) – termonukleáris fúzió,  $B=13$  T indukciójú szupravezetős mágnessel,
- 37 MW HTS motor – Navy Ship 2007, BSCCO 2223 szupravezetővel,
- szélgenerátoroknál a nehéz és drága ritkaföldfém mágnesek kiváltása 6 MW teljesítmény felett,
- LHC (Large Hadron Collider, CERN European Council for Nuclear Research) – részecske gyorsító, 27 km alagútban 1500 t szupravezető kábel, 5000 szupravezetős mágnes (impulzus üzemben 8,36 T indukció), NbTi szupravezetővel.

*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)
13. Eckroad S.: Superconducting Fault Current Limiters, Technology Watch 2009 1017793. Electric Power Research Institute.  
<http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/000000000001017793.pdf>

Összeállította: Kádár István  
2015. április

### **Ellenőrző kérdések**

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