

SÜPER İLETKEN TAŞIYICILARIN DOĞRUSAL DÖNME DİNAMİĞİNİN ANALİZİ

Ahmet Cansız¹ ve Ömer Gündoğdu²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

²Makina Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Atatürk Üniversitesi, 25000, Erzurum

e-posta: acansiz@atauni.edu.tr

Anahtar sözcükler: Manyetik ve Süper iletken Taşıyıcılar, Enerji Depolama

Özet

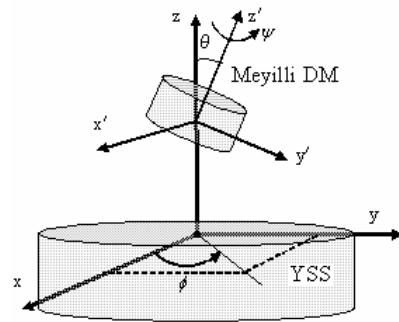
Bu makalede yüksek sıcaklık süperiletken üzerinde taşınan disk şeklindeki daimi mıknatıs rotorun dönme dinamiği deneysel ve teorik olarak çalışılmıştır. Rotor mıknatıs ile süperiletken arasındaki etkileşme, mıknatıs manyetik dipol olarak süperiletken ise diyamanyetik ortam kabul edilerek modellenmiştir. Bu çalışmanın süperiletken kısmını ilgilendiren manyetomekanik analizinde “donuk görüntü” kavramı, diamanyetik görüntü ile birleştirilmiştir. Böyle bir sistemin etkileşim potansiyeli manyetik ve yerçekimi potansiyellerinin toplamı olarak ifade edilmiştir. Dinamik analize göre daimi mıknatıs rotorun hareket denklemleri, yatay, düşey, meyil (tilt), yalpalama (precession) ve dönme (rotation) açısının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Titreşim davranışı ve yönler arası titreşim korelasyonu, sistemin hareket denklemlerinin Runge-Kutta metoduyla sayısal olarak çözülmesiyle elde edilmiştir. Teorik bulguların deneysel olarak teyid edilmesi için doğrusal ve dönme testleri gerçekleştirilmiştir.

1. Giriş

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin (YSS) bulunmasıyla bir çok mühendislik uygulaması ortaya çıkmıştır. Bu tür uygulamalar genel olarak daimi mıknatıslar (DM) ile süperiletkenler arasındaki etkileşmeler üzerine kurulmuştur. Bu uygulamaların en önemlisi YSS’lerin enerji depolama sistemlerinin manyetik kısımlarında denge elemanı olarak kullanılmasıdır. Bu tür uygulamaların yaygınlaşması teorik ve deneysel çalışmalarla daha da hızlanmıştır. Daimi mıknatıslarda yapılan iyileştirmeler ve süper iletkenlerdeki sürekli gelişmeler de süperiletkene dayalı uygulamaları artırma yönünde olmuştur. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin taşıyıcı (Bearing) uygulamalarında genellikle süperiletken üzerinde taşınan dönen DM rotorun denge problemi çok önem taşımaktadır. Bu nedenle YSS’nin DM’nin sağlamış olduğu manyetik alana olan tepkisel cevabı geniş bir şekilde deneysel ve teorik olarak çalışılmaktadır. Ancak, şu ana kadar yapılan modellemeler, süperiletkendeki karmaşık histeresisten dolayı yeterli olduğu söylenemez. Bu karmaşık histeresin yanında daimi mıknatısın hareketi

süperiletkendeki manyetik akı çivilenmesine (flux pinning) ve manyetik alanı dışlama (screening) özelliklerine de bağlıdır. Bu problemlerden dolayı meyil (tilt), yalpalama (precession) ve doğrusal olmayan kayıplar gibi olaylar meydana gelmektedir.

Yüksek sıcaklık süperiletken taşıyıcılarının gerçek geometriklerin çalışılması elektromagnetik ile birlikte mekanik analiz de gerektirmektedir. Bu makalede YSS tarafından taşınan DM’nin titreşimleri ve dönme dinamiği çalışılmıştır. Daha önce yapılmış çalışmalara göre, ilk üç boyutlu dinamik analiz Rossman ve Budric tarafından yapılmıştır [1]. Son zamanlarda Sugiura ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada “Donmuş görüntü” modelini kullanarak DM ve YSS etkileşme potansiyelini ifade edip, mıknatısın yatay, düşey ve meyil etkisini araştırılmıştır [2]. Bu çalışmada ise, büyük açısız momentumlarda meyil ve yalpalama etkisi problemi açıklığa kavuşturularak daha tamamlanmış bir dinamik analiz ile açısız titreşim karakteristikleri çalışılmıştır.



Şekil 1. Süperiletken üzerinde taşınmakta olan daimi mıknatısın şematik görünümü.

2. Manyeto-Mekanik Analiz

Yüksek sıcaklık süperiletkenler üzerinde taşınan DM rotorun hareketini temsil eden denklemler, aralarındaki karmaşık potansiyelden dolayı çözümleri kolay değildir. YSS ve DM sisteminin geometrisi Şekil 1 de gösterilmektedir. Böyle bir sistemde manyetik etkileşme potansiyeli ‘Donmuş görüntü’ kavramına

göre ifade edilebilir [3]. Bu yaklaşımda DM manyetik dipol olarak ve YSS de akı çivilenmesi ve diyamanyetik özelliği olan ortam olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada ‘Donmuş görüntü’ kavramına göre YSS deki histeresis ihmal edilmiştir. Kuasi-statik hareketler için, ki bu durumda histeresis ana kayıp kaynağı değildir, ‘Donmuş görüntü’ kavramı daimi mıknatıs ile süperiletken arasındaki kuvvet etkileşmesini başarılı bir şekilde tahmin etmektedir. Buna ek olarak, böyle bir sistem için dinamik durum söz konusu olduğunda da tahminlerin başarılı olması beklenmektedir.

Yüksek sıcaklık süperiletkenler ile DM arasındaki etkileşim yaklaşıklıkla manyetik dipollerle görüntüleri arasındaki kuvvetler ile ifade edilebilir. Böyle bir sistemde birinci dipol DM’yi temsil edip ikinci dipol ise birinci dipolün görüntüsünü oluşturmaktadır. Sistemin toplam potansiyel enerjisi

$$U = \beta \left[\frac{1 + \cos^2 \theta}{2(2h + H + z)^3} + \frac{\cos \theta}{A_1^3} - \frac{3A_2(2h + H + z)}{A_1^5} \right] + Mg(h + H/2 + z) \quad (1)$$

ile verilmektedir. Burada M rotorun kütlesi, g yerçekimi ivmesi, H DM nin yüksekliği, h alan soğutma yüksekliği ve z de taşıma yüksekliğini ifade etmektedir. Yine, m_1 ve m_2 bu dipollerin manyetik momentleri olup r konum vektörüdür. $\beta = \mu_0 m_1 m_2 / 4\pi$, $\gamma = 2h + H + z$, $A_1 = (r^2 + \gamma^2)^{1/2}$ ve $A_2 = r \sin \theta + \gamma \cos \theta$ ile ifade edilmektedir. Denklem 1 dipol ve onun diamanyetik imajını temsil etmektedir. Dipol ve onun “donmuş görüntünü” temsil etmek için bu denklem iki ile çarpılmalıdır. DM’nin YSS üzerinde her hangi bir alan soğutma yüksekliğinde (h) taşındığında iki görüntü ortaya çıkar: biri donmuş görüntü diğeri ise diyamanyetik görüntüdür. Levitasyondan önce bu görüntülerin YSS yüzeye olan uzaklığı h olup, soğutma tamalanıp tutucu uzaklaştırılınca DM ile YSS arasında bir kuvvet oluşur. Bu konfigürasyonda donmuş görüntü h uzaklığında sabitlenmiş iken, diyamanyetik görüntü ise daimi mıknatısın hareket etmesiyle hareket etme kabiliyetine sahiptir. Böylece, DM YSS’nin yüzeyinden (h+z) kadar uzaklıkta olmuş olur ve bu uzaklığa da taşıma yüksekliği denir. Soğutma işlemi bittikten sonra donmuş ve diyamanyetik görüntüler büyüklük bakımından eşit olup birbirine zıt yönelimlidirler. Böylece donmuş görüntü metodu DM ile donmuş ve diyamanyetik görüntüleri arasındaki net etkileşme kuvvetinin sıfır olduğunu ifade etmiş olmaktadır.

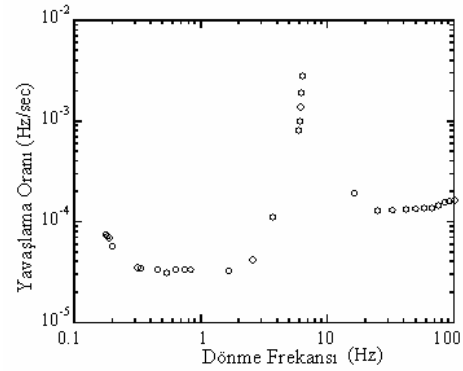
Üç boyutlu uzayda DM/YSS sisteminin kinetik enerjisi ise simetrik topacinkine benzer olup açısız bileşenlere ek olarak doğrusal bileşenler de içerir;

$$T = [M(\dot{r}^2 + r^2\dot{\phi}^2 + \dot{z}^2) + I_r(\dot{\phi}^2 \sin^2 \theta + \dot{\theta}^2) + I_z(\dot{\phi} \cos \theta + \dot{\psi})^2] / 2 \quad (2)$$

Bir ve iki numaralı denklemlerden Lagrange hareket denklemleri elde edilerek sistem karakterizasyonu yapılabilir [4].

3. Deneysel ve Sayısal Sonuçlar

Bu çalışmanın süper iletkenli manyetik taşıyıcının dizayn aşamasındaki optimizasyonda büyük fayda sağlanacağı deneysel tasarım yapılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi, DM’nin yavaşlaması düşük frekanslar için daha hızlı olmaktadır. Bu olay, muhtemelen DM veya süper iletkendeki türdeşizlik sebebiyle DM’nin kütle merkezi etrafındaki dengesizlikten oluşan bir tork ile izah edilebilir. Yani, düşük açısız hızlarda frekans konuma bağlı hale gelmektedir. Yüksek hızlar için ise dönel kayıplar daha fazla olduğu görülmekte olup frekanstan bağımsızdır.



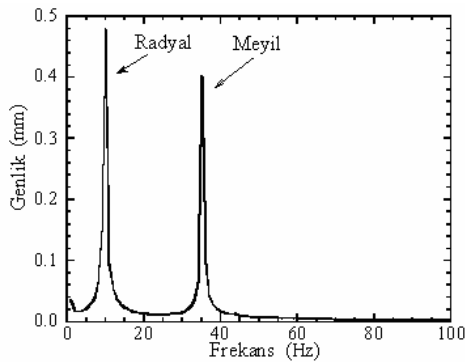
Şekil 2. Daimi mıknatısın yavaşlama oranının açısız frekans ile fonksiyonu.

Düşük hızlarda DM’nin titreşim mekanizması çevredeki termodinamik değişimlerden etkilenmektedir [5]. Taşıyıcı dinamiği ile ilgili termodinamik bir fenomen, başlangıçta hareketsiz bir şekilde yükseltelen bir PM diskinin dönmesine sebep olacak muhtemel titreşimleri yaratabilir. Bunun sebebi, DM içindeki sıcaklık gradyanıdır. Mıknatıslanmanın sıcaklığa bağımlılığı taşıma kuvvetinin merkezine kütle merkezinin altında olmasına sebep olur ki bu da mekanik olarak kararsızdır. DM’deki titreşim frekansı ve ısı difüzyon zamanı karşılaştırıldığında, küçük titreşimler daha yüksek genliklere büyür ve sonunda kendini besleyen rotasyonlar oluşur.

Süper iletken üzerinde taşınan DM için hareket denklemlerinin çözümünü elde etmek denge analizi gerektirir. Manyetik sistemlerin doğrusal olmayan tabiatlarından dolayı manyetik taşıyıcılar nonlineer davranırlar. Böyle sistemlerin fiziksel bir çözümünü bulabilmek için genellikle doğrusallaştırma işlemi yapılır. Denge analizi için yaygın bir yol, pertürbasyon teorisinin kullanılmasıdır. Pertürbasyon işlemi uygulanmadan Runge-Kutta metoduyla sayısal çözüm yapıp deneylerle birlikte paralel sonuçlar elde edilmiştir [6]. Sisteme başlangıçta uygulanan sabit itki (pulse) altında, sayısal çözümlerden, 10 mm yükseltelen DM’nin tipik bir dikey titreşim genliği zamana bağlı olarak analiz edilebilmektedir.

Açık hava deneylerine göre, 15 mm üzerinde bir yükseklikte taşıma mümkün değildir. Yapılan deneylerde, en yüksek alan soğutma yüksekliğinin 13 mm olduğu görülmüştür. Bundan daha yüksek taşıma konumlarında oldukça zayıf olup, DM, fiziksel bozucu etkilere karşı kararlılığını koruyamamakla birlikte kararlı dengede de kalamamaktadır. Bu davranış, denklem (1) ve (2)'de verilen teorik hesaplamalardan da elde edilebilir. Örneğin, 15 mm'den daha yüksek taşıma konumları için dikey titreşim genliği zamanla sapar ve fiziksel olmayan bir çözüm sergiler. Bu ise taşımanın bu yükseklikte mümkün olmadığını gösterir. Diğer taraftan, 15 mm'den daha az taşıma yükseklikleri için dikey titreşim genlikleri zamanla azalan sapsmalarla dengeye yakınsar.

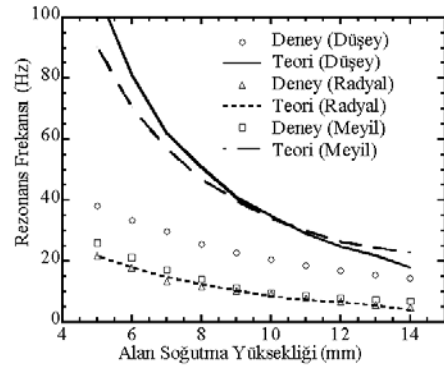
Dikey uygulanan impuls diğer yönleri etkilememesine rağmen, DM'e radyal veya meyil yönünde bir etki uygulandığında radyal ve meyil yönünde titreşim modları görülür. Şekil 3'de, etkinin radyal yönde uygulandığı durumda ki teorik titreşim spektrumu gösterilmiştir. Aynı frekans spektrumunda hem radyal hem de meyil titreşiminin görünümü, bu yönler arasındaki güçlü kuplajın olduğunu gösterir. Bu ise, tüm titreşim frekans modlarının, gerçekte dikey, yanal ve hatta açısall yönlerdeki saf titreşim modlarının bileşimi olduğunu gösterir. Dikey rezonansın radyala deneysel oranı 1,7 ila 2,9 arasında değişirken teorik olarak 1,4 ila 2,8 arasında değiştiği Şekil 4'den görülebilir. Kantitatif olarak radyal yönde teori ile deneyler arasında tam bir uyum vardır. Yalnız, dikey yönde bu uyum çok güçlü olmayıp uyum, özellikle meyil yönünde gittikçe daha kötüleşir. Dikey yönde bu fark, histeretik etkiden dolayı olup sistemde bir damper etkisi yapar.



Şekil 3. Yarı çap ve meyil yönlerindeki titreşimlerin titreşim frekansı ile fonksiyonu.

Dinamik açıdan sönüm kuvvetlerinin verdiği cevap, sistemin efektif potansiyelinin neden olduğu kuvvetlerle kıyaslandığında dominant değildir. Bu nedenle modelde sunulan analiz, dikey, radyal ve meyil yönündeki hareketin çalışılması için güvenilir olduğu kabul edilmiştir. DM'nin yalpalaması oyuncak topaça benzer bir davranış gösterir. Oyuncak topaç, yalpalama frekans vektörü ve aynı yöndeki açısall momentuma sebep olan bir aşağıya doğru yerçekimi kuvvetinin etkisi altındadır. Diğer taraftan, süper iletken üzerinde yükseltelen DM, yalpalama frekans vektörü ve zıt

yönde bir açısall momentuma sebep olan yukarı doğru bir itici kuvvet etkisi altındadır. Topaç, bulunduğu noktadaki bir eksen (pivot) noktası etrafında yalpalar, fakat DM birinci derecede kendi kütle merkezi etrafında yalpalar. Manyetik merkez ile kütle merkezi arasındaki açıklık (eksantriklik), mıknatıs ile süper iletken arasındaki türdeşsizliğin (homojen olmayan) fazla olmasıyla artar. Topaç için, eksen noktasında yalpalamaya direnç gösteren her hangi bir sürüklenme (drag) kuvveti topacın daha da eğilmesine sebep olur. Mıknatıs için, yalpalamaya direnç gösteren süper iletkendeki sürüklenme kuvveti mıknatısın dikey yönünde telafi edilir ki bu volan taşıyıcıları (flywheel bearing) uygulamalarında kararlılığı sağlar. Topacın yalpalaması ve dönmesi, mıknatıs ve süper iletken sisteminin davranışına da benzer. Sayısal sonuçlardan, yalpalama ve dönme açılarına bir başlangıç itkisi (impulse) verildiğinde sistemin cevabı gerçek durumdan daha farklıdır. Bu da yine sistemde sönümün olmamasındandır.



Şekil 4. Rezonans frekanslarının karşılaştırılması.

Sonuç olarak, daimi mıknatıs ve süperiletken sisteminin tamamlanmış bir dinamik analizinin yapılabilmesi problemi hem manyetik hem de mekanik olarak inceleme gerektirmektedir. Bu çalışmada süper iletken üzerinde taşınmakta olan disk şeklindeki mıknatısın düşey ve yatay (radyal) doğrultulardaki titreşim frekansları sayısal olarak hesaplandı ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla örtüştüğü gözlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Sugiura T, Aoyagi T, Yoshizawa M, IEEE Trans. on Appl. Supercond., 13, 2247 (2003)
- [2] Rossman C E and Budnic J I *Physica C* 295 304 (1998)
- [3] Hull J R and Cansiz A *J. Appl. Phys.* 86 6396 (1999)
- [4] Cansiz A, Hull J R and Gundogdu Ö, *Supercond. Sci. Technol.* 18 1-7 (2005)
- [5] Hull J R *Supercond. Sci. Technol.* 13 R1 (2000)
- [6] Chapra S C and Canale R 1998 *Numerical Methods for Engineers* (New York: McGraw Hill).