MIT Açık Ders Malzemeleri
http://ocw.mit.edu

8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002

Lütfen aşağıdaki alıntı biçimini kullanınız:

> Lewin, Walter, *8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002* (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare). http://ocw.mit.edu (accessed MM DD, YYYY). License: Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike.

Not: Alıntılarınızda lütfen bu materyalin gerçek tarihini kullanınız.

Bu materyalin alıntı olarak gösterilmesi veya kullanım koşullarımız hakkında daha fazla bilgi için, http://ocw.mit.edu/terms web sitesini ziyaret ediniz.

MIT OpenCourseWare
http://ocw.mit.edu

8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002

Transkript – Ders 20

Bugün, bir devrenin kendi ürettiği manyetik akıyla mücadelesinde devrenin yeteneğini sayılarla belirteceğim.

Bir devreniz varsa ve üzerinden bir akım geçiriyorsanız, bazı manyetik alanlar yaratırsınız; eğer akımlar değişiyorsa, manyetik alanlar da değişecektir.

Böylece bu devrede değişime karşı durmaya çalışan bir indüklenmiş EMK olacaktır; bunu öz-indüktans terimiyle ifade edeceğiz: L, öz-indüktans ve "öz" sözcüğü kendisi anlamında.

Onu kendisi yapıyor.

Devre tarafından üretilen manyetik akı, daima akımla orantılıdır.

Akımı iki katına çıkarırsanız, manyetik akı da iki katına çıkar.

Böylece L olarak adlandırdığımız orantılılık değişmez, bu bir öz-indüktanstır; bu nedenle, indüklenmiş EMK eksi d fi B/dt'ye eşittir; bu Faraday Yasasıdır.

Dolayısıyla, EMK, eksi LdI/dt haline gelir.

L sadece bir geometri meselesidir. L akımın bir fonksiyonu değildir.

Çok basit bir durumda, bir solenoidin öz-indüktansını sizin için hesaplayacağım.

Bu bir solenoid olsun ve bu bir kapalı devre. Solenoid'ten bir I akımı geçireceğiz. Bu sarımların yarı çapı küçük r'dir.

Diyelim ki burada N sarım var ve solenoidin boyu küçük ℓ.

Daha önceden, Amper yasasını kullanarak, solenoidin içindeki manyetik alanı, mü 0 çarpı I çarpı büyük N bölü ℓ olarak türettiğimizi hatırlayacaksınız.

Bu, metre başına sarım sayısıdır.

Bu kapalı halkaya bir açık yüzey tutturursak, ki bu açık yüzeyin neye benzediğini hayal etmek çok zordur, ---bunu birçok kez tartışmıştık--- bu açık yüzey, solenoid'in içinde bir tür döner-merdiven basamakları gibi bir yüzeydir.

Manyetik alan bu yüzeye N kez girer, çünkü N tane sarımımız vardır.

(cc) BY-NC-SA

Böylece Fi B manyetik akısı, bir halkanın yüzey alanı, yani pi kere küçük r'nin karesi, çünkü solenoid içinde manyetik alanı sabit ve dışında 0 kabul ettik, ki bu çok iyi bir yaklaştırımdır.

Tekrar edersek, bir halkanın pi küçük r kare yüzey alanı, çarpı N, --çünkü N halkamız var—bunu da sabit olan manyetik alan ile çarpmalıyız.

Böylece şunu elde ederiz: N kare --çünkü burada da bir N var--, mü 0, I bölü ℓ .

Bunu, L çarpı I olarak adlandırırız. İşte öz-indüktans için tanımımız budur.

Buna göre, L öz-indüktansı sırf geometriktir.

O, pi küçük r'nin karesi, büyük N'in karesi bölü ℓ çarpı mü 0 'dır.

Bunu kontrol edeyim.

Pi küçük r'nin karesi var, büyük N'in karesi var, mü0, bu da doğru, bölü küçük ℓ.

Böylece, örneğin, birkaç kez sınıfta kullandığımız solenoidin öz-indüktansının ne olacağını hesaplayabiliriz.

2800 sarımlı bir solenoid'e sahiptik.

r, sanıyorum 5 santimetre kadardı--- dikkatli olun, SI'de çalışmalıyız---ve uzunluğu 0,6 metreydi.

Bunu burada bir çok kez tartışmıştık; bu sayıları burada yerine koyarsanız, bu solenoidin öz-indüktansını SI birimlerinde 0,1 bulacaksınız. Bu SI birimine Henry diyoruz; büyük H.

Bu, amper başına volt-saniye ile aynı olacaktır; fakat bunu kimse kullanmıyor.

Bunu Henry olarak adlandırıyoruz.

Her devrede öz-indüktans, küçük de olsa sonlu bir değere sahiptir.

Bazen o kadar küçük olur ki, onu yok sayabiliriz; fakat basit bir halka, basit bir akım alırsanız, -- dolanan bir tel, ister dikdörtgen, ister çember olsun, fark etmez--- bu akım halkası, daima bir manyetik alan oluşturur.

Yüzeyden daima bir manyetik akı geçer ve dolayısıyla o sonlu bir öz-indüktansa sahip olur.

Sadece 9 nano-Henry olabilir, sadece mikro-Henry olabilir, fakat hiçbir zaman 0 değildir.

Şimdi, bir devrede öz-indüktansın varlığının dikkate değer sonuçlarını göstermek istiyorum size ; çok basitten başlıyorum.

Burada EMK'si V olan bir bataryaya sahibim.

(cc) BY-NC-SA

Burada bir anahtar var ve burada öz-indüktansım var.

Bir devrede öz-indüktansı daima bu halkalarla gösteririz ve burada bir seri direncim var, ki onu da daima bu dişlerle gösteririz.

Geçen bir akım yokken, anahtarı kapatırım.

Diğer bir deyişle, t = 0 anında anahtarı kapatırsam, burada akım olmaz.

Bu anahtarı kapattığımda akım artmak isteyecektir; fakat öz-indüktans “hop-hop-hop” diyecektir, yavaş ol, Lenz Yasası, akımın böyle değişmesinden hoşlanmadım.

Böylece öz-indüktans, ondan geçmek isteyen akımla mücadele eder.

Yeterince beklerseniz, bir an gelir ki öz-indüktans savaşı kaybeder, ve elbette akım, Ohm Yasasından bulabileceğiniz gibi, maksimum bir değere ulaşır, çünkü öz-indüktans bir dirence sahip değildir.

Öz-indüktansın süper iletken bir malzemeden yapıldığını düşünün. Direnç yok.

Böylece çok fizik bilmeksizin, geçen akımı, zamanın fonksiyonu olarak çizebilirsiniz.

0 ile başlarsınız ve yeterince beklerseniz, sonunda, basitçe V bölü R olan Ohm Yasasıyla verilen maksimum bir akıma ulaşabilirsiniz.

Yavaş yavaş bu değere yaklaşırsınız.

Ve ne kadar yavaş yaklaştığınız, öz-indüktansın değerine bağlıdır.

Öz-indüktans çok yüksekse, o bunun gibi tırmanır; böylece bu, çok yüksek bir L değeridir.

Öz-indüktans çok düşükse, bu da düşük bir L değeri olur.

Öz-indüktans 0 olsaydı, o aniden yukarı çıkardı; fakat sıfır öz-indüktans diye bir şeyin olamayacağına sizi ikna etmiştim az önce.

Ne kadar küçük olursa olsun, daima sonlu bir değer vardır.

Böylece henüz beyninizi kullanmayıp midenizi kullanırsanız, nitel olarak bunu beklersiniz.

Ara sıra midenizi kullanmanızda yanlış bir şey yok; fakat şimdi bunu daha uygar hareket ederek yapmak istiyorum; ve beynimi kullandığımda, bu devre için bir denklem kurmalıyım.

Eğer kitabınızı okursanız, Bay Giancoli’nin size Kirchhoff’un Halka Kuralını kullanmanızı söylediğini göreceksiniz.

Fakat Bay Giancoli Faraday Yasasını anlamamış, ve sadece tek o değil.

(cc) BY-NC-SA

Elbette, fizik okuduğunuz her okul kitabı bu yanlışı yapıyor.

Onlar size, devre boyunca kapalı halka entegralinin 0 olduğunu söyleyen Kirchhoffun İlmek Kuralını kullanmanızı tavsiye eder.

Elbette bunu söylemek saçmalıktır. O nasıl 0 olur?

Çünkü değişen bir manyetik akı vardır; dolayısıyla o ancak eksi d fi/dt olur.

Size 8.02 web sitesine girmenizi ve orada bulacağınız bir ders ekini indirmenizi tavsiye ederim; bu ekte bu sorunu anlatıyorum ve bu yanlışa şiddetle saldırıyorum.

Böylece E nokta dL'nin kapalı halka integrali, eğer devrenin etrafında dolaşırsanız, 0 değil, eksi d fi/dt'dir --Faraday Yasası-- ; dolayısıyla eksi LdI/dt'dir.

Demek ki devre boyunca dolanmalıyız ve Kirchhoff Yasasını değil, Faraday Yasasını uygulamalıyız. Kirchhoff Yasası burada uygulanmaz !

Burası bataryanın artı kutbudur ve burası eksi kutbu; böylece batarya içindeki elektrik alan bu yöndedir.

Öz-indüktans içindeki elektrik alan 0'dır, çünkü öz-indüktans dirence sahip değildir; böylece o süper-iletken bir malzemedir. Direnç içindeki elektrik alan – akım bu yöndeyse, ki öyle olacak --, direnç içindeki elektrik alan bu yönde olacaktır.

Böylece şimdi kapalı halka integrali düzenli bir şekilde aşağıya E nokta dL olarak yazarım.

Buradan başlarım ve daima akım yönünde giderim; size de aynı şeyi yapmanızı öneririm.

Akım için acaba yanlış yön mü tahmin ettim diye dikkat bile etmem.

O da uygundur.

Sonra, eksi işaretler bunu doğrultacaktır, onlar aslında yanlış yönü seçtiğinizi size söyleyecektir; fakat halkayı daima akım yönünde dolanın, çünkü o zaman EMK daima eksi LdI/dt'dir.

Eğer akıma ters yönde giderseniz, o artı LdI/dt olur ve bu karışıklığa yol açabilir.

Böylece daima akım yönünde gideceğim ve ilkin öz-indüktans üzerinden geçeceğim.

Öz-indüktans içinde elektrik alan yoktur; böylece buradan buraya giderken entegral E nokta dL 0'dır.

Kitaplarda yanlış olan yer burasıdır. O, 0'dır.

Şimdi, direnç üzerinden geçerim, ve böylece artı IR elde ederim;E ve dL aynı yöndedir.

(cc) BY-NC-SA

Ohm Yasası bunun IR olduğunu söyler.

Bataryanın içinde, elektrik alanının tersinde giderim ve böylece eksi V elde ederim.

Şimdi bu eksi LdL/dt'ye eşittir, ve bu devrede Faraday Yasasını uygulamak için tek doğru yol budur.

Bunu, daha iyi anlam içeren, biraz farklı bir biçimde yazabilirsiniz.

Örneğin, V'yi ve L'yi aynı tarafa getirebilirsiniz---böylece V eksi L dL/dt eşit IR yazabilirim.

Baktığınızda aynı denklemdir, ama onu bu şekilde yazmanın hoş tarafı şudur ki burada dL/dt pozitif olduğundan --zamanla artmaktadır---indüklenmiş EMF, ki değeri bu – dikkat ederseniz, o daima bataryanın voltajına karşı durmaktadır – işte Lenz Yasasının aslı budur.

dL/dt 0 olmadıkça, V eşit IR değildir; kuşkusuz yeterince uzun süre beklerseniz, V eşit IR olur.

Böylece bu diferansiyel denklemi çözmeliyiz; sık sık yapılan, tüm terimleri sol tarafa getirip sağ yanı sıfırlamaktır.

Sık sık LdL/dt artı IR eksi V eşit 0 denklemini görürsünüz..

Ve burası 0 olduğu için, bazı fizikçiler bunu Kirchhoff Kuralı'nın bir uygulaması sanır.

Bu çok saçmadır. Bütün terimleri bu tarafa getirerek onu daima 0 yapabilirsiniz.

E nokta dL'nin kapalı halka integrali 0 değildir; E nokta dL'nin kapalı halka integrali eksi LdL/dt'dir; fakat eksi LdL/dt'yi bu tarafa geçirirsem, burada 0 elde ederim.

Kuşkusuz, bu kitapları yazanlar, bunun doğru yanıt olduğunu biliyorlar ve şöyle bir manevra yapıp bu denklemi elde ediyorlar ve buna Kirchhoff Kuralı diyorlar.

Üzüntü verici, ve ne kadar da can sıkıcı.

Neyse, çözeceğiniz denklem budur.

Bazılarınız bu denklemi zaten Mekanik'te çözebiliyordunuz.

Elbette orada I yoktu.

Orada konum için X vardı; muhtemelen bunu sürtünme söz konusu olduğunda çözmüştünüz. Belki de çözmediniz.

Bu diferansiyel denklemin çözümünü vereceğim. Çok kolay bir çözümdür.

Akım, zamanın fonksiyonu olarak, bir maksimum değer çarpı 1- e üzeri eksi R bölü L çarpı T'dir; burada I_{max} , V bölü R'dir; bu maksimum akımdır.

(cc) BY-NC-SA

Buna biraz daha ayrıntılı biçimde bakalım:

İlk olarak, t = 0 olduğunda, gerçekten I = 0 bulacağımıza dikkat edin.

Burada t yerine 0 yazarsanız, 1-1'i elde edersiniz.

Böylece gerçekten I = 0 olduğunu bulursunuz.

t'nin sonsuza gittiği yazılırsa, tam beklediğiniz gibi, gerçekten I'yı V bölü R olarak bulursunuz.

Eğer t sonsuz olursa, açıkça öz-indüktans, tabir caizse, tüm gücünü kaybetmiştir ve akım basitçe V bölü R'dir; sahip olacağınız maksimum akım budur.

Bu bir gerekliliktir, bu bir gereksinimdir.

Eğer L bölü R saniye beklerseniz---- inanın ya da inanmayın, eğer biraz zamanınız varsa, gerçekten L bölü R'nin, birim olarak, saniye olduğuna kendinizi ikna edersiniz—evet, L/R saniye beklerseniz, I akımı, I_{mak} 'ın yaklaşık %63'ü olur,; çünkü eğer t = L/R ise, 1-1/e elde edersiniz, ve bu da yaklaşık olarak 0,63'tür.

Eğer iki misli zaman beklerseniz, maksimum akımın %86'sına sahip olursunuz.

Diğer bir deyişle, işte burada,- eğer L/R saniye beklersem, bu değer, olası maksimum değerin 0,63'ü olur, ve sonra hızla tırmanır ve asimptotik olarak, eninde sonunda maksimum akıma yaklaşır, yani V/R olur.

Emin olmak için, Web'de bulabileceğiniz ek ders notlarını indiriniz.

Şimdi şunu yapacağım, bu voltajı aniden 0'a indireceğim.

Bunu yapmanın yolu, basitçe kısa devre yapmaktır.

Elbette tahtada, basitçe onu kaldırıveririm. O artık orada olmaz.

Akım hâlâ akıyor ve aniden yeni bir zamanda -- gene t_0 zamanını tanımlarım -- voltaj 0'dır.

İşte şimdi "şimdi neler olacak?" sorusu gelir.

Evet, öz-indüktans aslında akımın azalmasından hoşlanmaz, böylece bu değişimle savaşacaktır: Dolayısıyla akımın hemen sönmeyeceğini beklersiniz; beklediğiniz gibi, akım, buna benzer olarak aşağıya doğru iner.

Yeterince beklerseniz, istersiniz ki, t sonsuza gittiğinde; burada, t = 0 da akım hala maksimumdur, yani hala V/R'dir; fakat sonsuza gittiğinizde -- yeteri kadar beklerseniz – o zaman kuşkusuz, akım 0 haline gelmelidir.

Ve akım sönerken, şu dirençte saniye başına $I^2 R$ joule hızıyla ısı üretilir ve sonra öyle bir zaman gelir ki akım neredeyse 0 olur ve tüm gösteri biter.

(cc) BY-NC-SA

Diferansiyel denklemimize geri dönüp V'yi 0 yaparak, tam zaman davranışını da hesaplayabiliriz.

Nerede şu diferansiyel denklem? Gizleniyor mu? Oh, işte burada !

Bu diferansiyel denklemi çözdüm; fakat bu şimdi 0'dır.

Bu diferansiyel denklemin çözümü şudur: I akımı, zamanın fonksiyonu olarak, I_{max} çarpı e üzeri eksi R bölü L çarpı t 'dir. Bu ifade, sahip olmasını istediğiniz tüm niceliklere sahiptir; çünkü dikkat ederseniz, t = 0'da -- t = 0 koyarsanız -- akım gerçekten maksimumdur ve istenilen de budur.

Büyük V'yi 0 yaptığınız an işte budur; akım hala geçmektedir.

Fakat dikkat ederseniz, t sonsuza gittiğinde---yeterince beklediğinizde--- akım gerçekten de 0 olmaktadır.

Ve L bölü R saniye beklerseniz, maksimum akımınızın %37 'sine düşersiniz.

Böylece şimdi I'ye giderseniz, bu t = 0'da I'yi tanımlar; böylece şimdi L bölü R saniye beklerseniz, buradaki bu değer, şu değerin %37'si kadardır.

Böylece %63 kaybınız var.

Ve böylece görüyorsunuz ki, bu, devrenin kendi yarattığı manyetik akısıyla mücadele etme yetisine sahip olma olgusunun bir sonucudur.

Batarya yerindeyken, akım burada mutlu bir şekilde akıyorken, akım, diyelim ki, her an I_{max} değerindeydi -- en azından bu değere -- V / R 'ye -- çok yakındı.

Dolayısıyla her an, dirençte üretilen bir ısı vardır.

Saniye başına I kare R joule kadar. Bu enerjiyi kim sağlıyordu? Elbette ki batarya.

Fakat şimdi, şimdi bataryayı çıkardığımda, hâlâ akım geçiyor; bu demektir ki, akım sönerken, dirençte hâlâ üretilen ısı vardır ve bu ısı, akım en sonunda 0 oluncaya kadar, yavaş yavaş çıkmaya devam eder.

Peki şimdi enerji nerden geliyor?

Enerji solenoid'te var olan manyetik alandan gelir, ve bu düşünce---yani sahip olduğunuz bu enerji, ki aslında önce manyetik alan formundaydı, şimdi ısı formunda çıkmaktadır – "manyetik alan enerji yoğunluğu" olarak adlandırdığımız şeyi geliştirmemizi sağlar.

İlk önce, akımın bir maksimum değerden 0 'a ininceye dek, ne kadar ısı çıkacağını hesaplayalım.

Hmmm, bazı şeyleri silmek zorundayım. Bu kısmı sileceğim.

(cc) BY-NC-SA

Böylece akım, zamanın her anında, dirençte ısı üretir; öyleyse, voltaj t = 0'da 0 oluyorsa, ısı miktarı şudur; uh-uh, burada kare yok.

I kare R dt 'nin 0'dan sonsuza kadar alınmış entegrali, akım sönerken üretilen toplam ısıdır. Bu akımı biliyorum--- az önce sildim onu, ama hâlâ hatırlıyorum---böylece I_{max}'ı dışarı alırım ve direnci dışarı alırım ve burada 0'dan sonsuza e üzeri eksi R bölü L çarpı t dt'nin integrali kalır.

Bu çok basit bir entegraldir. Bu integral, L bölü 2R'dir.

Bu arada, o I karedir, böylece burada 2'ye sahibim.

Bu çok önemli. 2'yi unutmayın.

Ve böylece bu integral L bölü 2R'dir; böylece I maksimum kare R L bölü 2R sonucuna bakarsam, bir bölü iki L çarpı I_{max}^2 'yi elde ederim.

Bu, ısı biçiminde ortaya çıkar; I_{max} ise, akım uzun bir süre aktıktan sonra sahip olduğumuz maksimum akımdır.

Artık sayılarla oynayıp, bu alanda metre küp başına ne kadar enerji olduğunu hesaplayabilirim; çünkü manyetik alan tamamıyla solenoidin içindedir.

Sonunda bir bölü iki, L I^2 kadar enerji çıkacağını biliyorum. I ifadesi burada var, böylece I yerine B bölü mü 0 çarpı L bölü N'yi koyabilirim ve burada L 'yim var.

Burada L'yi yerine koyarım, ve I'yı yerine yazarım ---şimdilik maksimumu bırakabilirsiniz--- Bu açıkça bize zamanın her anında solenoid boyunca giden bir I akımına sahipken, solenoidin içinde manyetik alan biçimde mevcut olan enerjinin (1/2) L I^2 olduğunu söyler.

Böylece bunu yaparsanız, yani büyük L ve büyük I 'yi yerlerine yazarsanız; (1/2) L I^2 'nin , B^2 bölü 2 mü0 çarpı pi küçük r^2 çarpı küçük ℓ olur.

Bunu evde kontrol edin. Basit bir yerleştirme işlemidir.

Fakat bu, solenoidin manyetik alan içeren hacmidir; dışarıda her yerde manyetik alanı 0 kabul etmiştik.

Bunu kabul ederseniz, manyetik alan enerji yoğunluğu için – yani, metre küp başına ne kadar enerji olduğu ile ilgili -- bir sonuç bulursunuz – bu da kuşkusuz, bu değerdir.

Çünkü bu, manyetik alanın toplam enerjisidir, akımı biliyorsak ve bu da, manyetik alanın hacmidir.

Dolayısıyla, manyetik alan enerji yoğunluğu B^2 bölü 2 mü 0'dır; metre küp başına joule.

(cc) BY-NC-SA

Böylece, ilke olarak, uzayın her yerinde manyetik alanı biliyorsanız, tüm uzay üzerinden entegralini alırsınız ve manyetik alan içinde var olan toplam enerjiyi hesaplayabilirsiniz.

İlk derslerimizde, elektrik alan için de benzer şeyler yapmıştık.

Elektrik alan enerji yoğunluğunu hesaplamıştık.

Belki de onun ne olduğunu hatırlarsınız. O, bir bölü iki epsilon 0 kappa çarpı E^2 idi.

O da metre küp başına joule'dü.

Bu, bir elektrik alan halinde, yükleri belli bir yerleşimde düzenlemek için yapmam gereken işi temsil eder.

Manyetik alan halindeyse, saf bir öz-indüktör içinden akımı geçirmek için yapmam gereken iştir bu.

Bunun anlamı, öz-indüktörün direncinin 0 olduğudur; solenoid, akımın gelişmesine karşı çıktığı için iş alır ve dolayısıyla ben iş yapmak zorunda kalırım.

Böylece bu ikisi arasında bir paralellik vardır.

Size, öz-indüktörlerin kendi akımlarına ne kadar şiddetle karşı çıkabildiklerini çok dramatik bir şekilde göstereceğim; bunu şuradaki düzenekle yapacağım; burada 12 voltluk bir araba aküsü ve iki tane ampül var.

Ve burada 30 Henry'lik devasa bir L öz-indüktansına sahibim.

Bu derste, daha sonra, böylesine yüksek bir öz-indüktansın nasıl yapılacağını öğreneceğiz. Burada bir ampülüm var.

Bu ampul 6 ohmluk bir dirence sahip.

Bu öz-indüktans, ona burada yapılacak bir şey yok. 4 ohmluk bir dirence sahip olabilir.

Burada süper iletken tellerimiz de yok; dolayısıyla teller 4 ohm kadar dirence sahiptir.

Bu konuda da bir şey yapamam; beni bağışlayın!

Burada 4 ohmluk bir başka direncim var ve diğerinin aynısından -- 6 ohmluk – bir ampül daha ve burada araba aküm artı bir anahtarım var.

Araba aküsü 12 volt. Anahtarı kapatacağım, akım geçecek.

Bu ampülün neredeyse aniden yandığını göreceksiniz.

Bu halkada öz-indüktans yoktur --- şey, belki birkaç mikro Henry veya daha az var -- fakat bu halka içinde burada devasa bir öz-indüktans vardır, ve böylece öz-

(cc) BY-NC-SA

indüktansın akıma aldırmadığı söylenir; aldırmıyor, sadece bekliyor, ve ampülün çok yavaş yandığını göreceksiniz.

Bunun ne kadar süre aldığını hesaplayabiliriz; çünkü burada 10 ohma ---6 ohm ve 4 ohm---sahibiz; böylece L bölü R, 30 bölü 10, -- ki bu 3 saniyedir.

Böylece, bu zamanın iki katı olan 6 saniye sonra bile, ampulden geçen akım, onun maksimununun sadece %86'sıdır.

Fakat, ampuldeki ışık kuşkusuz I^2 R ile orantılı olduğundan, bu demektir ki ışık, maksimumun sadece %75'idir; 9 saniye bekleseniz bile, burada ortaya çıkan ışık maksimumunun hâlâ sadece %90'ıdır, oysaki bu hemen ortaya çıkar.

Buraya 4 ohmu koymamızın nedeni, ohmik direnç açısından, bu kısmın bu kısma özdeş olmasını istememizdir.

Buraya yapay olarak 4 ohm eklemiş olmamızın nedeni budur; çünkü öz-indüktansta daima 4 ohm vardır, buna bir şey yapamayız.

Şimdi dikkate değer bir örnek göreceğiz.

Bu bir ampül..

Bir tane de burada, ve bir ampül de burada var. İnanılmaz canavar olan öz-indüktans buradadır.

Işıkları açacağım; ampul ışıklarını daha iyi görebilmeniz için, ışık düzeninde birazcık değişiklik yapacağım.

Ampuller sadece 8-wattlık ampüllerdir; çok güçlü değiller, fazla parlak da değildir; fakat etki çok açık olacak.

Hazır mısınız? – Sanırım, hemen yanacak olan bu; bu biraz zaman alacak—üç, iki, biiir; sıfır.

Bir, iki, üç, dört, beş, altı, gördünüz mü nasıl yavaş?

Hala parlak değil, gittikçe de parlaklaşıyor.

O hâlâ bunun kadar parlak değil.

Gitgide parlaklaşıyor. Aslında zamanı sayarak bunu yapabilirsiniz.

Bu arada, size verdiğim direnç değerleri, lamba ısındığında gerçekleşir.

Üç, iki, bir, sıfır,,,, bir, iki, üç, dört, beş, altı, yedi, sekiz, dokuz, on, on bir, on iki, hala parladığını göremiyorum.

Burada gördüğünüz, öz-indüktansın kendisiyle savaşımına dikkate değer bir örnektir.

Öz-indüktans adının böylesine hoş olması bundandır.

(cc) BY-NC-SA

Şimdi bir adım daha ileri gitmek ve LR devresine bir dalgalı akım kaynağıyla güç vermek istiyorum.

Bir AC yani dalgalı akım güç kaynağınız varsa -- ki bunda voltaj her zaman değişir -- şimdi, kuşkusuz, öz-indüktans hep savaşım halindedir, bu devrede gördüğümüz gibi sadece başlangıçta değil; şimdi neredeyse her zaman aktiftir.

Böylece şunu kaldırayım ve şimdi bataryanın yerine AC güç kaynağını koyayım, ki normalde buraya bir dalgalandırıcı koyuyoruz; burada L öz-indüktansı var ve burada da R direncimiz.

Bu güç kaynağından sağlanan voltaj V_0 çarpı kosinüs omega t olur; omega açısal frekanstır.

Şimdi, Faraday Yasasını uygulayacağım, Kirchhoff Kuralını değil -- Faraday Yasasını-- Bu devrenin etrafında dolandığımda, bir diferansiyel denklem kurarım.

Kuşkusuz, diferansiyel denklem bunun tam aynısı olacaktır -- bu V hariç – bu V, şimdi V_0 çarpı kosinüs omega t'dir. Şimdi bu diferansiyel denklemi çözmeliyim.

Tek fark budur; tam sıfırdan başlamak zorunda değilim.

Bu diferansiyel denklemin çözümü oldukça dikkate değerdir ve sezgisel değildir.

Akım -- zamanın fonksiyonu olarak – bu kez, V_0 bölü karekök R'nin karesi artı omega L'nin karesi çarpı kosinüs omega t eksi fi'dir; bu fi açısının tanjantı, omega L bölü R'dir.

Kuşkusuz, bunları özümsemek için zamana ihtiyacınız var.

İlk dikkat edeceğiniz şey, akım ve sürücü voltaj arasında bir faz gecikmesinin varlığıdır.

Eğer fi, göreceğiniz gibi 90 derece ise, akım bir çeyrek devir kadar gecikir; aslında olması gereken sezgisel olarak akımın sürücü voltajdan sonra gelmesidir, çünkü öz-indüktans değişen akımla mücadele ediyor.

Böylece akımın biraz sonra gelmesi, burada gecikme olması, belki de sizi şaşırtmaz.

Eğer burada bu denkleme bakarsanız, kosinüsün önünde sahip olduğunuz terimin maksimum akım olacağı açıktır; çünkü kosinüs terimi artı 1 ile eksi 1 arasında dalgalanır, ve böylece burada bu, elde edebileceğiniz maksimum akım.

Bir tam devirde, pozitif net değer ve negatif net değer elde edersiniz.

Burada omega L'nin gerçekten direnç rolü oynayacağına dikkat edin. Ve omega L'nin gerçek boyutu ohmdur.

O gerçekten bir direnç rolü oynar; omega çok büyükse, buradaki direnç de çok büyüktür ve böylece akımımız düşük olur.

(cc) BY-NC-SA

Bu sezgisel olarak akla yatkındır; çünkü omega büyükse, dL/dt değişimleri de büyüktür ve böylece çok hızlı değişimler olunca, indüklenmiş EMF de büyük olur ve böylece akım düşük olacaktır.

Ayrıca, L büyükse, sistemin mücadele yeteneği de güçlü olur, böylece büyük bir direnç oluşur.

Böylece L'nin burada, aşağıda, görünmesi de akla yakın gelir.

Eğer omega düşükse, kafanızda omegayı 0 yapabilirsiniz.

Omega 0 olduğunda, dalgalı akıma bile sahip değilsiniz; o zaman sabit akıma sahipsiniz demektir. Omegayı 0 yaptığınızda, basitçe I eşit V_0 bölü R elde edersiniz.

Bu Ohm Yasasıdır; bunu elde edeceğiniz açıktır.

Şimdi faz açısına bakalım.

Fi'nin tanjantı, omega L bölü R'dir.

Eğer öz-indüktans çok büyükse, sistem güçlü bir mücadele etme yeteneğine sahiptir; böylece akımda büyük bir gecikmeye neden olur ve omeganın büyük olması halinde de bu geçerlidir.

Eğer omega büyükse, değişimler çok küçük zaman skalalarında olur ve böylece sistemin geri mücadelesi güçlü olur.

Çünkü hatırlarsanız, daima dL/dt ile orantılı EMK'ye sahipsiniz.

Böylece, omega ve L'nin burada, yukarıda yer alması iyidir.

Bunlardan birinin yüksek olması, sistemi mücadeleye sokar ve akımı geriletir.

Bir LR devresine sahip olduğum bir durumu çözmüştüm – bu Web'dedir; onu kopyalamanıza gerek yok, oradan indirebilirsiniz -- bu değerlere sahip olmamın nedeni şudur: bu, doğrudan doğruya, biraz sonra yapacağım bir gösteri deneyiyle bağlantılıdır.

R ile seri bağlı bir L görüyorsunuz. L = 10 milihenry ve R = 10 ohmdur. V_0 ise 10 volt olsun.

Ve burada üç frekans görüyorsunuz: 100 hertz, 1000 hertz ve 10000 hertz. Ve burada omeganın değerleri.

Hertz'leri 2 pi ile çarpmalısınız.

Ve şimdi omega L'ye bakın.

Düşük frekansta -- yüz hertz -- omega L eşit 6,3 ohmdur.

Bunu 10 ohm ile karşılaştırın.

(cc) BY-NC-SA

Onlar karşılaştırılabilir, fakat şimdi, örneğin, 10000 hertz'e bakın.

Omega L muazzam. 630 ohm.

Böylece, o, söz yerindeyse tamamen bu devrenin direncini belirler.

Dolayısıyla geçecek olan akım -- en azından maksimum akım bu değerdedir, ki bunu tahtada da görmüştük – evet bu akım, yüksek frekansta aşırı derecede düşüktür.

Aynı V_0 değerine sahip olmasına karşın, düşük frekanstaki akımdan 50 kez daha düşüktür.

Ve sonra burada faz açılarını görüyorsunuz.

Bu değerlere sahip olmanızın nedeni şudur: bunu size dinletebilirim, bunu size duyurabilirim; çünkü sizin duyma yetiniz 100 Hertzde çok iyidir, ve hepiniz genç olduğunuz için herhalde 10000 hertzi bile duyabilirsiniz; belki bazılarınız 20 kilohertz'i bile işitebilir.

Yaşlandıkça, yüksek frekansları duyma yetinizi kaybedersiniz.

Aslında, benim frekans kesimim, 4000 hertz civarında bir yerde.

Size müzik dinleteceğim; burada 3, 4, 5000 Hertz üretebilen kemanlar olacak ve sonra aniden 10 milihenry'yi açacağım.

İlkin burada 10 milihenry olmadan, size müzik dinleteceğim ve sonra 10 milihenry'yi açacağım; ne duyacaksınız; kemanlar yok olacak, çünkü yüksek frekansta şimdi akım muazzam azalacak; fakat düşük frekansta çok küçüktür; işte bu, bir öz-indüktörün neler yapabileceği konusunda size bir fikir verir.

Şunu dinleyiniz [kemanla klasik müzik çalıyor], şu anda burada öz-indüktör yok.

Müzik de yok.

Tamam.

Tamam.

Bu değişik bir müzik.

Öz-indüktör yok.

Öz-indüktör.

Yüksek frekanslar gitti.

Öz-indüktör yok.

Bir keman konçertosunu bir viyolonsel konçertosuna çevirebilirsiniz.

Sırf kemanları kestiniz. Tamam.

(cc) BY-NC-SA

Faz kaymasını size dinletemem, 90 derecelik bir faz kayması durumunda bile. 90 derecelik faz kaymasının ne anlama geldiğini anlarsak, bu açık hale gelir.

Bunun anlamı şudur: 10.000 hertz'in bir devri esnasında -- ki bu, saniyenin sadece 10.000'de 1'i kadar sürer -- bu yüksek frekanslar sadece 25 mikrosaniye kadar kayar; bunu ise kulaklarınızla duymanın bir yolu yoktur.

Bestecinin bu kemanların normalden 25 mikrosaniye daha önce gelmesini istemesi olgusu, kuşkusuz sizin duyamayacağınız bir şeydir.

Dolayısıyla size faz kaymasını dinletemem; fakat faz kayması için başka bir şeylere sahibim.

Ve bu " başka bir şeyler" için, bir önceki derse geri döneceğim -- bir kadını havaya kaldırdığım derse -- manyetik kaldırma konusuna.

O fikre geri döneceğim ve İlkbahar Tatili'nden hemen önce verdiğim o derste yaptığımdan biraz daha derine ineceğim.

Bir bobine sahiptim ve 60 hertz'lik dalgalı akımla bu bobini sürüyordum.

Yukarıdan baktığımızı düşünelim; akım saat yönünde akıyordu, ki bu onu sizinle tartışırken varsaydığım tam olarak buydu Bu bobin tarafından üretilen manyetik alan böyle geliyordu -- manyetik dipol alanı --.

Burada, bunun altında iletken bir plakamız vardı ve size demiştim ki, bu manyetik alan şiddeti artıyorken, burada, bu değişime karşı koymaya çalışan bir indüklenmiş EMK olacak; böylece indüklenen akım – ki ona girdap akımı diyorduk – bu yönde bir manyetik alan doğuracak.

Eğer bu saat yönüyse, bu akım saatin zıt yönünde gidecek, dolayısıyla bu yönde bir manyetik alan doğuracaktır.

O, artan manyetik alandaki değişime karşı koyar: Lenz Yasası.

İki akım zıt yönlerde olduğundan, ikisi birbirlerini iter.

Buna ikna olmuştunuz; böylece bir kadını havaya kaldırmıştık.

Bununla beraber, bana hiç kimse "biraz sonra manyetik alan hâlâ aşağı yönde fakat azalıyorken ne olur" diye sormamıştı; çünkü akım AC yani dalgalı akım olduğundan, zamanı gelince manyetik alan azalacaktır.

Şimdi buradaki EMK tersine dönmelidir; çünkü Lenz "üzgünüm, ben azalmadan hoşlanmıyorum" der.

EMK tersine döndüğü anda, bu akım da tersine dönecektir.

Şimdi iki akım aynı yöndedir; artık onlar birbirlerini çekerler ve böylece manyetik kaldırmanız gider.

(cc) BY-NC-SA

Zamanın yarısında birbirlerini çekerler, yarısında ise iterler.

Fakat gene de bir kadını havaya kaldırmıştık; işte bu sır öz-indüktansta yatar.

Orada burada bir yolda – ki bu yolu benim tahmin etmem çok zor – akan bu akım belli bir R direncine ve belli bir L öz-indüktansına sahiptir.

Omeganın ne olduğunu biliyoruz, yaklaşık 360'dır.

Böylece bu iletkende elde ettiğimiz indüklenmiş akım, şu denklemde verilen bir faz açısı kadar geride kalır, indüklenmiş EMK'in gerisinde kalır.

EMK derhal bu bobinin yaptığıyla bağlaşır, fakat indüklenen akım geride kalır.

Belki bunu biraz daha bile ayrıntılı olarak görmemizi sağlayacak bir şey var burada.

Bu kırmızı eğri bobinden, orada yukarıda gördüğünüz bobinden geçen akımdır.

Akım siyah çizginin üstünde olduğunda saat yönündedir ; siyah çizginin altında olduğunda ise saatin tersi yönündedir.

Düşey ölçek keyfidir. Yeşil eğri EMK'tir, ki o iletkende indüklenmiştir.

Dikkat ederseniz, manyetik alan arttığında, akım bobinde yükseldiğinde, iletkendeki EMK bu manyetik alanın değişimine karşı duracak yöndedir.

Ancak manyetik alan aşağı gittiğinde, bobindeki akım aşağı gittiğinde, EMK derhal tersine döner, ki biraz önce size bahsettiğim şey buydu. Dolayısıyla indüklenen akım ve indüklenen EMK aynı fazdaysalar, zamanın yarısında çekme ve diğer yarısında itme olur ve bu manyetik kaldırma vermez.

Burada gördüğünüz mavi eğri, indüklenmiş akımı temsil eder.

Buna girdap akımı diyorum.

İndüklenen EMK ve indüklenen akım arasında faz kayması yoksa, zamanın yarısında mavi akım ile kırmızı akımın zıt yönlerde olduğuna dikkat edin.

Onlar karşıt yönlerde olduklarında birbirlerini iterler.

Aynı yönlerde olduklarında birbirlerini çekerler.

Fakat şimdi, bir faz kayması varsa, öyle ki indüklenen akım EMK'ten sonra gelirse -- ben dramatik bir şey yapıyorum, faz kaymasını tam 90 derece alıyorum, böylece akım şimdi indüklenen EMK'ne göre 90 derece gecikmiştir -- şimdi bakın; kırmızı ve mavi eğriler daima zıt yönlerdedir.

Ve böylece zamanın yüzde yüzünde iten bir kuvvet vardır.

Bobin iletkeni iter ve iletken de bobini iter.

(cc) BY-NC-SA

Bir kadını havaya kaldırdığımız o durumda, eminim ki faz gecikmesi 90 derece değildi, sadece 30 ya da 40 dereceydi. Fakat net sonuç burada şudur ki, kayma 90 derece değildir; net olarak, ortalama anlamda, itici bir kuvvet elde ederim.

Bu bobinin kaldırması ve dolayısıyla bir kadının havaya kaldırılması halinde, itici kuvvetin gizi, burada sonlu bir öz-indüktansın yer alması olgusunda yatar..

R sıfır ise, tabiî ki süper iletkene sahibiz ve fi daima 90 derecedir.

R sıfır olduğunda, bu sonsuz derecede yüksektir; böylece 90 derece faz kayması elde ederiz. Bir gösteri deneyi yapmıştım, orada bir süper iletken üzerinde yüzen küçük bir mıknatısım vardı. O ideal bir durumdu.

Fi 90 dereceydi; böylece onlar daima birbirlerini ittiler.

Bugün daha kontrollu bir gösteri deneyi yapmak istiyorum; onun vasıtasıyla aslında öz-indüktansı hesaplayabilirim ve direnci de hesaplayabilirim.

Bugün yapacağım şey şu: Durağan bir bobin alacağım ve durağan olmayan bir iletken. İşte bobinim.

Dalgalı akım, 60 hertz. Bobin burada.

Bir halkam var, halka alüminyumdan yapılmış. Halkanın boyutlarını tam olarak biliyorum.

Yarıçapı biliyorum: yaklaşık 5 santimetre. Kalınlığı biliyorum, her şeyi biliyorum.

O bir alüminyum halka ve 5 santimetre kadar bir yarıçapı var.

Boyutlarını bildiğim için, bu halkanın direncini hesaplayabilirim.

Eğer size boyutları verirsem, bunu siz de yapabilirsiniz.

Halkanın direnci çok kaba olarak 7 çarpı 10 üzeri eksi 5 ohmdur. Çok küçük.

Bu arada, bu oda sıcaklığındaki direnç; sıcaklığı düşürürseniz, direnç de düşer.

Halkanın öz-indüktansını da çok kaba olarak hesaplayabilirim.

Bu o kadar kolay değil; çünkü burada öz-indüktansı hesapladığımda, manyetik alan sabit idi. Onun içeride sabit, düzgün olduğunu varsaymıştım.

Halka halinde, bu durum söz konusu olamaz. Bir dipol alanına sahipsiniz.

Bununla birlikte, halkanın yüzeyinde her yerde manyetik alanın aynı olduğunu varsaydım -- bu varsayımla %20 ya da 30 kadar yanılabilirim -- bu varsayımla öz-indüktansı 10 üzeri eksi 7 Henry bulurum.

Omeganın ne olduğunu biliyorum.

(cc) BY-NC-SA

Omega 360, kaba olarak; böylece bu halka için, bu omega frekansında, omega L bölü R'yi yaklaşık olarak 1/2 bulurum.

Ve bu bana 25 derecelik bir fi faz açısı verir; böylece halka bobin tarafından itilir ve kuşkusuz, bobin de halkayı iter.

Halkayı buraya koyacağım; halka bunun tarafından desteklenir, böylece halka devrilip düşmez.

Bu deney ile diğeri arasındaki tek fark şudur ki, her şeyden önce orada çok nicel olabilirim, gerçekten de faz açısını hesaplayabilirim ki bu, burada neredeyse olanaksızdır.

Burada, iletkeni kaldıracağım; bobin durağan.

Orada ise durağan olan iletkendi; bobin yüzüyordu. Fakat kuşkusuz fikir kesinlikle aynıdır.

Şimdi yapmak istediğim, burada onu görmenizi sağlamak; aslında, hmmm, onu yapmalıyım, bu yukarıya yükselmeli.

Evet, burada halkayı görüyorsunuz.

Belki de öncelikle size tüm deney düzeneğini göstermeliyim.

Halka buraya konuyor, bu bir alüminyum halka; basitçe bu bobinden 60 hertz, 110 volt geçirerek halkayı yukarı kaldıracağım; umarım yanlış bir şey yapmam.

Hayır, dalgalı akımı açmalıyım. Aman Tanrım, bu değildi, evet, amacım bu değildi.

İşin güzel yanı şu ki, şimdi halkanın üzerinde oturan bir kadın yok.

Düşüncem onu havaya kaldırmaktı.

Bu arada, itildiğini gördünüz; bu oldukça açıktı. Aşırı yüksek bir akım vardı.

Akımım aşırı yüksek; dolayısıyla onu biraz düşüreceğiz. Akımı yavaş yavaş arttıracağım; onun havaya kaldırıldığını görmenizi istiyorum.

İşte, yükseliyor.

Oh, ekran kapandı. İşte. Ve onu kapatıyorum; o hala yükseliyor, tabii ki.

Bunun sırrı, öz-indüktans tarafından ortaya konan faz gecikmesidir.

Başka bir halkam daha var burada, o da alüminyumdan, aynı halka; ancak dar bir yarığa sahip.

Bu halkadaki EMK aynı olacak. Fark yok.

(cc) BY-NC-SA

Aslında, bu halkanın öz-indüktansı aynıdır; fakat direnci muazzam; çünkü orada bir yarık var ve direnç neredeyse sonsuzdur.

Böylece, direnç sonsuz olursa, L'nin ve omeganın ne olduğu önemli olmadan, fi 0'a gidecektir. O itmeyecektir.

Zamanın yarısında çekecek, yarısınnda itecektir.

Bu demektir ki hiçbir şey olmaz; manyetik kaldırma yoktur.

Benzer EMK, benzer öz-indüktans, fakat sonsuz direnç; ve orada siz manyetik kaldırma görebilirsiniz.

Direncinin çok büyük olması nedeniyle, halkada indüklenen akım aşırı küçük olduğundan, halka üzerindeki kuvvet – ister itme, isterse çekme olsun -- her durumda pratik olarak 0 'dır.

Böylece bu, halkanın hiç hareket etmemesi için yeterli bir nedendir.

Tamam, yarın yaptığınız motorların heyecanlı testi sırasında hepinizi görmeyi umut ediyorum.

(cc) BY-NC-SA