

# **2. Bölüm: Transformatörler**

**Doç. Dr. Ersan KABALCI**

# **2. Bölüm: Transformatörler**

## **2.1. Transformatörlere Giri**

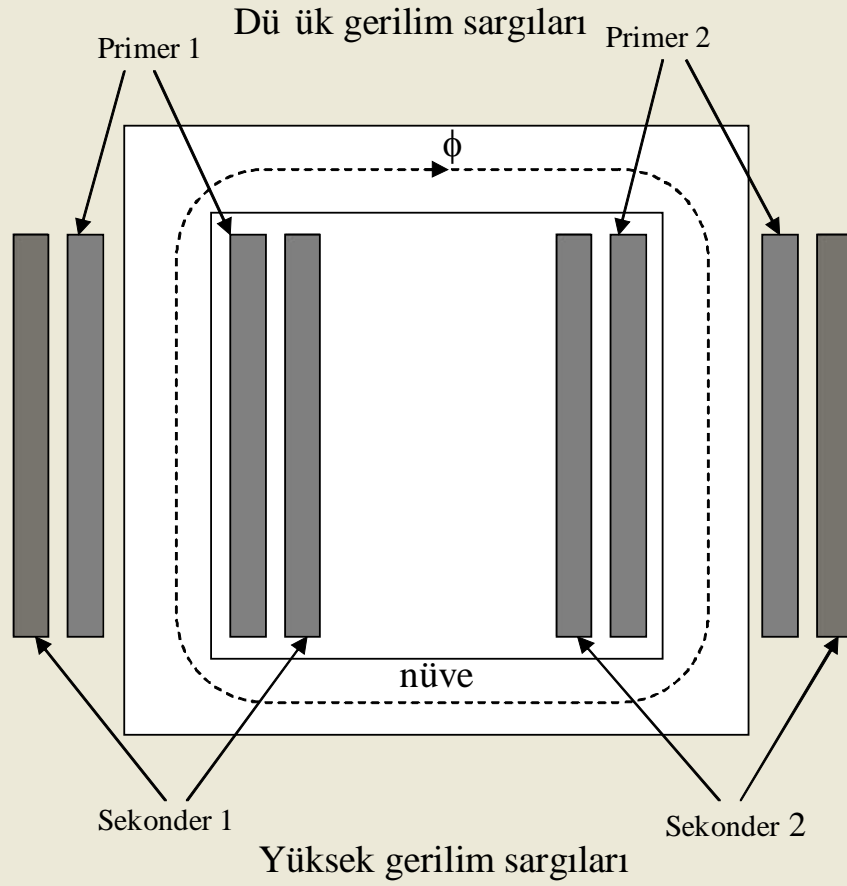
## Transformatörlere Giri

- Transformatör, alternatif akım *elektrik gücünü* bir gerilim seviyesinden başka bir gerilim seviyesine dönüştürür. Bu dönüşüm *manyetik endüksiyon* yoluyla gerçekleştirilir.
- Bir transformatör, ortak bir ferromanyetik nüve üzerine sarılan iki veya daha fazla sayıdaki sargıdan oluşur.
- Sargılar arasındaki bağımlı nüvede oluşturulan manyetik akı sağlar.
- Yüksek manyetik bağımlı ve yüksek akı yoğunluğu sağlamak için ferromanyetik nüve kullanılan transformatöre *demir nüveli transformatör* denilir ve yüksek güç uygulamalarında kullanılır.

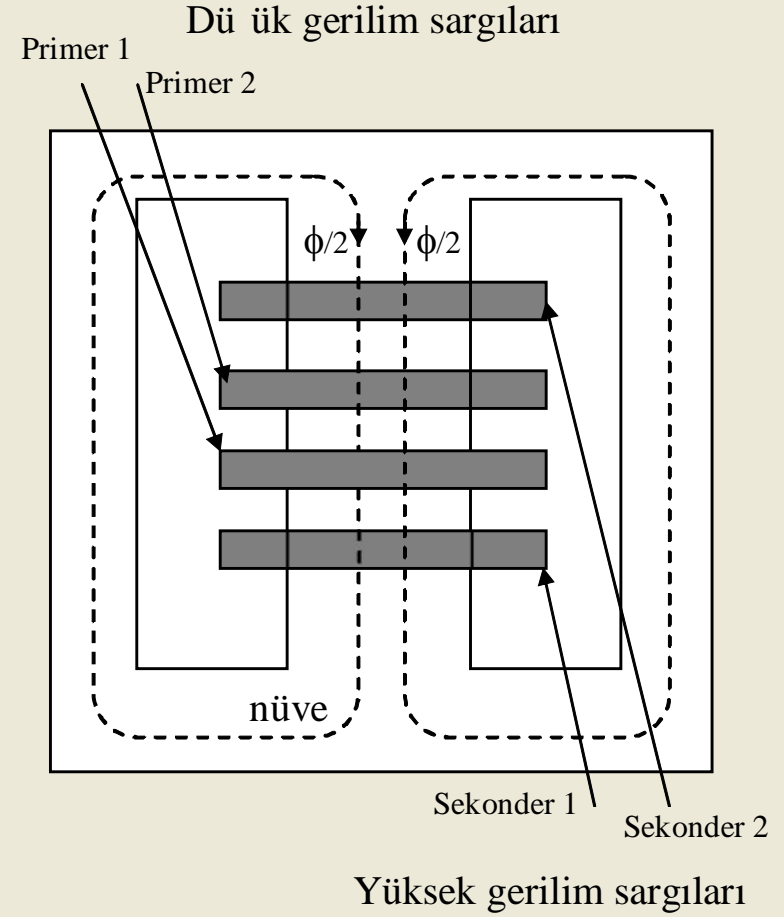
## Transformatörlere Giri

- Transformatör sargısının birisi AA güç kayna ına ba lanırken di er sargı yüklere AA gücü sa lamak üzere ba lanır.
- Elektrik güç kayna ına ba lanan sargıya “primer sargı” veya “giri sargısı”, yüklere ba lanan sargıya ise “sekonder sargı” veya “çıkı sargısı” denilir.
- Bir transformatör bir AA gerilim seviyesini ba ka bir gerilim seviyesine de i tirirken sa ladı ı gerçek güç de eri (ideal durumda) etkilenmez.
- Bir transformatör bir devrenin gerilim seviyesini yükseltir ise, akımı azaltmak durumundadır. Çünkü transformatörün giri gücü ile çıkı gücü e it olmalıdır.

# Çekirdek ve Sargılar



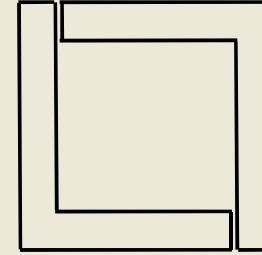
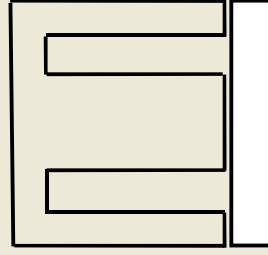
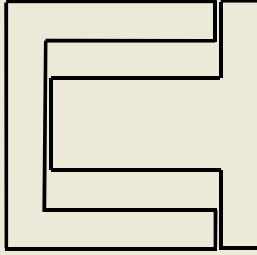
Çekirdek tipi nüve



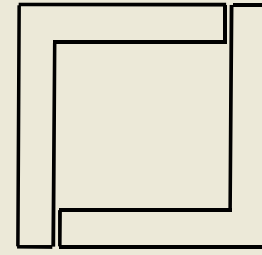
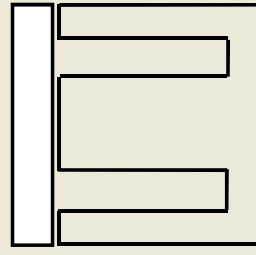
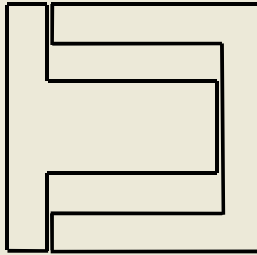
Ceket (mantel) tipi nüve

## Çekirdek ve Sargılar

Alt kat



Üst kat



- Nüve kayıplarını azaltmak için manyetik nüve ince ve silisli lamine saclardan paketlenerek olu turulur.
- Silikon çelik saclar yakla ık olarak %3 silikon, %97 çelik içerirler.
- Birkaç yüz saykılın altındaki frekanslarda çalı an transformatörlerde kullanılan silisli çelik sacların kalınlı ı 0.35-0.6mm aralı ındadır.
- L biçimli veya U ve I biçimli saclar çekirdek tipi yapıda kullanılırken E ve I biçimli saclar ceket tipi yapıda kullanılır.
- Parçalı yapıllı nüvelerde sargılar nüveden ayrı olarak hazırlanır ve nüveye kolayca yerle tirilebilir.

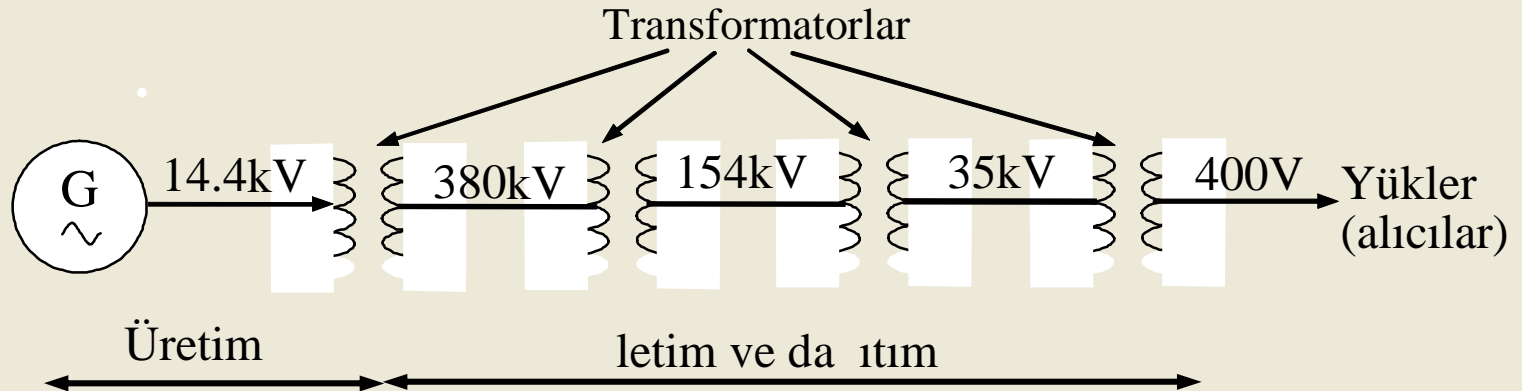
# Çekirdek ve Sargılar

elektriksel temsili



ki sargılı bir transformatorun elektriksel temsili

## KULLANILMA KADEMELER



Transformator ile değişik gerilim seviyelerinde güç iletimi

## Transformatör Çe itleri

➤ Bir transformatörün çıkı gerilimi giri geriliminden yüksek ise *yükseltici*, dü ük ise *dü ürücü* transformatör olarak adlandırılır.

- letim transformatörleri
- Ara istasyon transformatörleri
- Da ıtım transformatörleri
- Güç (kayna ı) transformatörleri
- Ototransformatörler
- Yalıtım (izolasyon) transformatörleri
- Ses (audio) frekans transformatörleri
- Kontrol transformatörleri
- Ölçü transformatörleri



## Transformatör Çe itleri

- **iletim transformatörleri** büyük güçlüdürler (MVA) ve çok yüksek gerilimin uzaklara iletilmesinde gerilim yükseltici olarak kullanılırlar.
- **Ara istasyon transformatörleri** ise gerilimi orta seviyelere düşürmek için kullanılırlar.
- **Da ıtım transformatörleri** ise orta seviyelerdeki gerilimleri daha alt orta seviyelere düşürmek için kullanılırlar ve büyük güçlü transformatörlerdir.
- **Güç (kayna ı) transformatörleri** elektronik devrelerde kullanılır ve birçok farklı tip ve uygulamaları vardır.
- **Ototransformatörleri**, genellikle düşük güç uygulamalarında ayarlı gerilim sağlamak için kullanılır.

## Transformatör Çe itleri

- **Yalıtım (izolasyon) transformatörleri**, giri ve çıkı gerilimleri e it olan transformatörlerdir. Yalıtım transformatörü do ru akımın yalıtımı amacıyla kullanılır. Primere uygulanan gerilim hem do ru akım hem de alternatif akım bile enlerini bulunduruyorsa, sekonder gerilimi sadece alternatif akım bile eninden olu acaktır.
- Yani, do ru akım bile eni çıkı a aktarılmayacaktır. Yalıtım transformatörleri, primer ve sekonder (yük) arasında elektrik yalıtımını sa lamak amacıyla da kullanılırlar. Yalıtım transformatörleri, küçük güçlüdürler ve normalde elektronik devreler ile topraklama hattı arasında ola abilecek gürültüyü yalıtmak için de kullanılırlar.
- **Ses (audio) frekansı transformatörleri**, ses frekansı (20kHz'e kadar) yükseltici devresi çıkı veya giri inde veya yükselticiler arasında empedans e lemesi için kullanılır.

## Transformatör Çe itleri

- **Kontrol transformatörleri**, dü ük güç veya VA de erlerinde sabit gerilim veya sabit akım gerekli devrelerde, elektrik sisteminde de i ik noktalarda gerilimin genli i ve fazında istenen düzenlemeleri sa lamak için kullanılır.
- **Ölçü tipi transformatörler**, sistemin yüksek enerjili kısmı ile ölçü aletleri ve elemanları (ampermetre, voltmetre, vatmetre ve röleler gibi çe itli koruma amaçlı kullanılan aletler) arasında emniyetli bir bağlantının sa lanması ve yüksek gerilim ve akımların izlenmesi için kullanılır.

# **2. Bölüm: Transformatörler**

## **2.2. Tek Fazlı Transformatörler**

## 2.2. Tek Fazlı Transformatörler

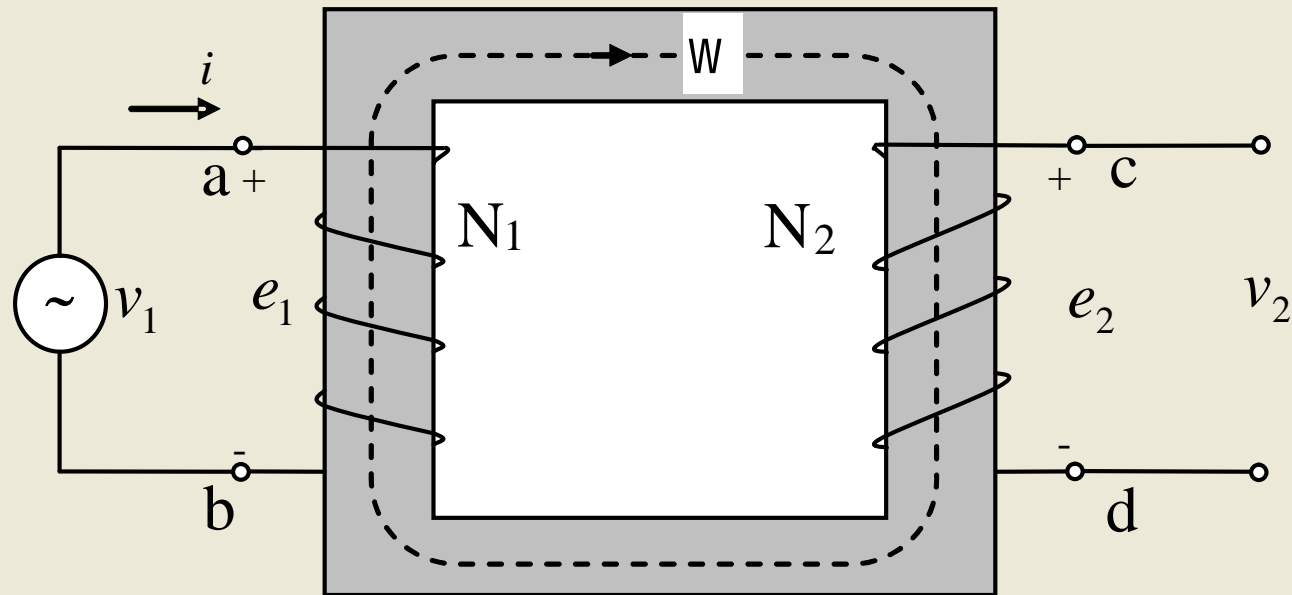
- Transformatörlerin gerçek özellik ve davranışlarını daha kolay anlamak için ilk aşamada *ideal transformatör* üzerinde durulacaktır.
- ideal transformatör durumunda modelleme ve analiz çalışmaları oldukça kolaydır. Daha sonra gerçek transformatörlerin modeli, yaklaşık değer devreleri, performans kriterleri olan gerilim regülasyonu ve verim, değer devre parametrelerinin tespiti, bir-fazlı transformatörlerin birbiriyle bağlantı şekilleri ve üç-sargılı transformatörler üzerinde durulacaktır.
- Burada temel olarak 50Hz kaynaktan beslenen güç transformatörlerine ağırlık verilecektir. Bu durumda kapasitif etkiler ihmal edilebilir. Ancak, yüksek-frekans uygulamalarında kapasitif etki dikkate alınmak zorundadır.

## 2.2.1. ideal Transformatörler

Transformatörlerin ideal sayılabilmesi için yapılan genel varsayımlar:

- Nüve kayıplarını oluşturan histeresis ve eddy akımı kayıpları ihmal edilmiştir.
- Kaçak akı ihmal edilmiştir. Yani, bütün akı nüve içinde sınırlıdır ve her iki sargıyı da keser.
- Akıyı meydana getirmek için gerekli uyartım akımı ihmal edilmiştir. Yani nüvenin geçirgenliği çok yüksektir.
- Sargıların dirençleri ihmal edilmiştir.

## 2.2.1. deal Transformatörler



deal transformatör

## 2.2.1. ideal Transformatörler

- Primer sargı zamanla değişen  $v_1$  gerilim kaynağına bağlanır. Bunun sonucunda gerilimin genliğine, frekansına ve primer sargı sarım sayısına bağlı olarak devreden geçen primer akımı tarafından üretilen ve zamanla değişen bir manyetik akı nüvede dolaşır.
- Nüvedeki değişken akı primer sargısında bir gerilim endükler ve bu gerilim primere uygulanan gerilime zıttır. ideal transformatörde primer sargı gerilimi ile endüklenen gerilimin polariteleri dikkate alındığında,

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\lambda_1}{dt}$$

- Sargı dirençleri ihmal edildiği için zıt emk, uygulanan gerilime eşit olur.

➤ Burada  $N_1$  primer sargının sarım sayısını,  $\lambda_1$  ise primer sargı akısını temsil eder.



## 2.2.1. deal Transformatör- Yüksüz

Zamanla de i en nüve akısı tarafından kesilen sekonder sargıda endüklenen emk;

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{dW}{dt} = \frac{d\}_2}{dt}$$

Burada  $N_2$  sekonder sargı sarım sayısı,  
 $\}_2$  sekonder sargı akısıdır.

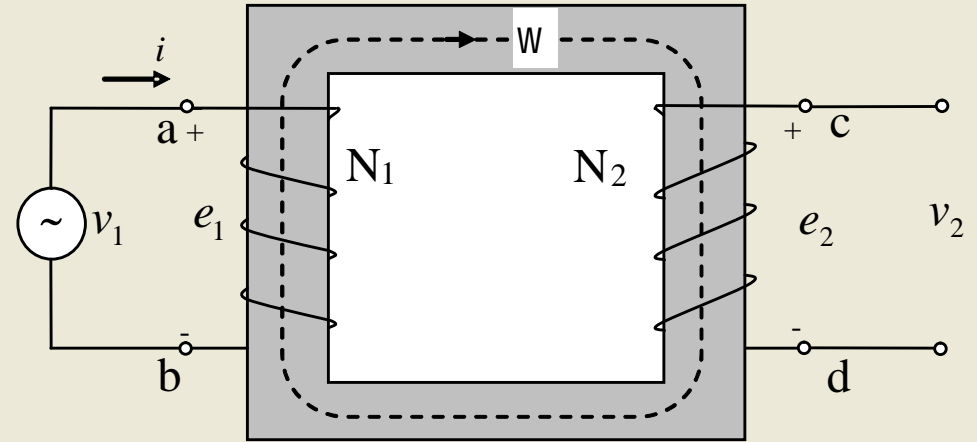
Primer ve sekonder gerilimleri oranlanırsa;

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Bu denklem, primerde ve sekonderde endüklenen gerilimlerin oranının primer ve sekonder sarım sayılarının oranına e it oldu unu göstermektedir.

$$\frac{N_1}{N_2} = a$$

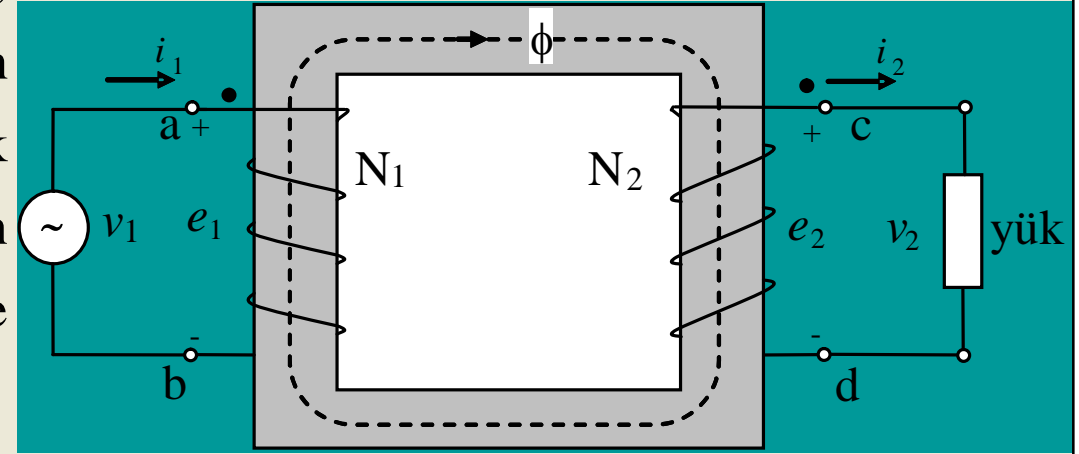
a sarım oranı veya dönü türme oranı olarak bilinmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır.



deal transformatör-Yüksüz

## 2.2.1. deal Transformator- Yüklü

Sekonder sargı uçlarına bir yük ba lanırsa, sekonderden yük akımı geçer. Akımın genli i yük empedansına ba lıdır. Ancak sekonder akımının üretti i manyetik akının yönü nüve akısını zayıflatma ve primerde endüklenen gerilimi azaltma e ilimindedir.



Yük ba lı ideal transformator

deal bir transformatorda  $e_1$  her zaman  $v_1$  gerilimine e it olmak zorundadır. Di er bir ifadeyle, nüve akısı daima yüksüz durumdaki gerçek de erine e it olmalıdır. Bu durumu sa lamak için yük akımı arttıkça,  $v_1$  gerilimi primer sargıdan daha fazla  $I_1$  akımı geçirir. Primer akımındaki artı primer ve sekonder sargılarından geçen akımların ürettikleri mmk'ler e it oluncaya kadar devam eder.

## 2.2.1. ideal Transformatör- Yüklü

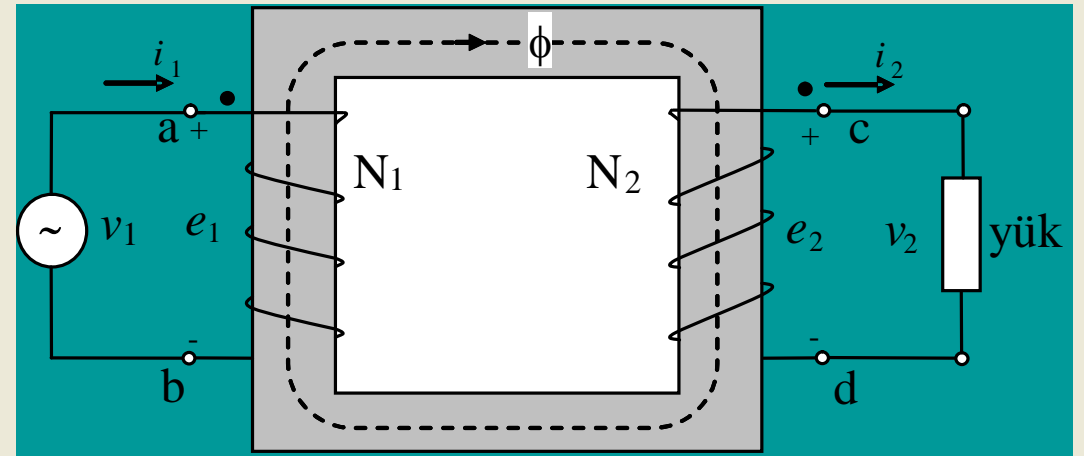
Kayıplar ihmal edilirse, transformatörün giri gücü ile çıkı gücü e it olur.

$$v_1 i_1 = v_2 i_2$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$



ideal bir transformatörde akımların oranının, gerilimlerin (veya sargıların) oranının tersine e it oldu u görülür. Bu sonuca göre, istenen her hangi bir gerilim de erinin, transformatörün sarım sayıları ayarlanarak elde edilebilece i görülmektedir.

## 2.2.1. deal Transformatör- Yüklü

Transformatörler geni bir sınıflandırmada,

Yükseltici

veya

Dü ürücü

tipler olarak adlandırılabilirler.

Yükseltici transformatörde:

$$N_1 / N_2 < 1$$

$$v_2 > v_1$$

Dü ürücü transformatörde:

$$N_1 / N_2 > 1$$

$$v_2 < v_1$$

## 2.2.1. ideal Transformatör- Yüklü

Primere uygulanan gerilimin sinüsoidal değişiminin neticesinde nüvede oluşan manyetik alan da ideal durumda sinüsoidal olacaktır.

$$W_{(t)} = W_m \sin \check{S}t$$

$$e_{1(t)} = N_1 W_m \check{S} \cos \check{S}t$$

$$e_{1(t)} = 2\pi f N_1 W_m \sin(\check{S}t + 90^\circ)$$

$$e_{1(t)} = \check{S} N_1 W_m \cos \check{S}t$$

$$e_{1(t)} = \sqrt{2} E_1 \sin(\check{S}t + 90^\circ)$$

$$e_{1(t)} = \sqrt{2} E_1 \cos \check{S}t$$

Primer emk'nin etkin değeri

$$E_1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_1 W_m$$

$$E_1 = 4.44 N_1 W_m f$$

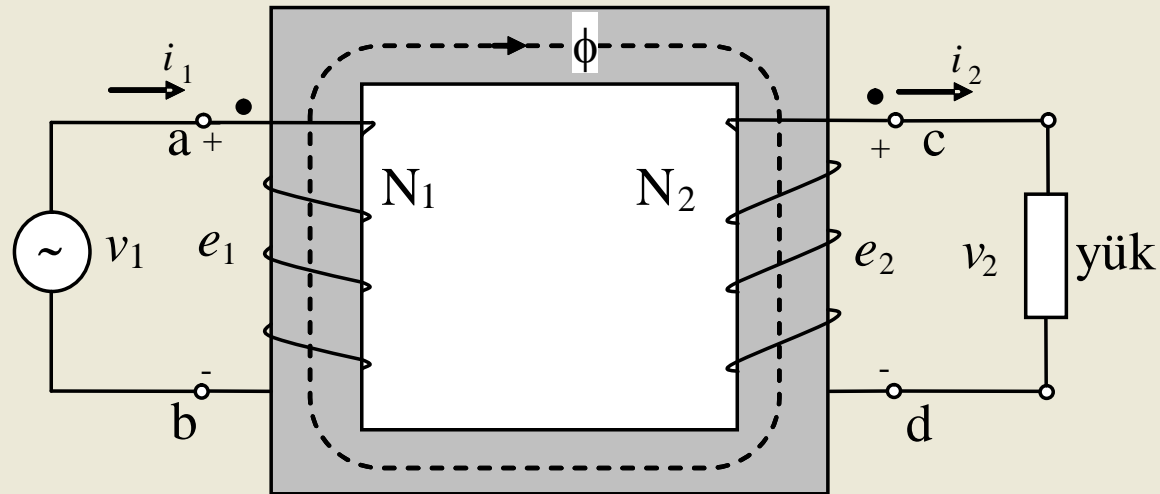
**Endüklenen gerilim:**

- Sarım sayısına
- Akı genliğine
- Kaynak frekansına orantılıdır.

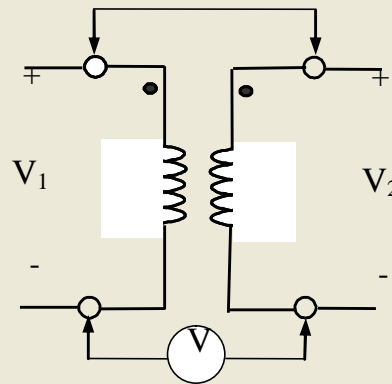
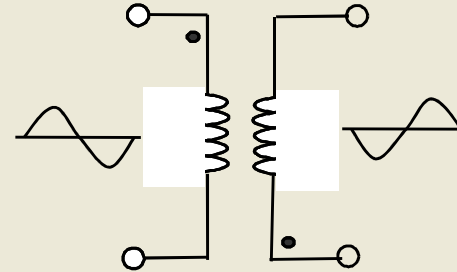
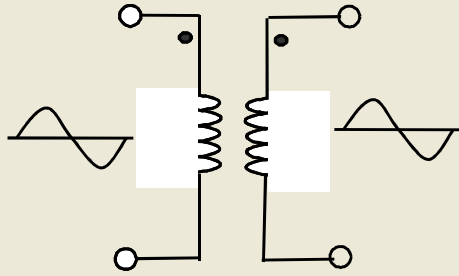
## 2.2.1. deal Transformatör- Polarite

➤ Transformatör polaritesi: Bir transformatörün ikiden fazla sargısı olabilir ve gerilim seviyesini yükseltmek için bu sargıların kendi aralarında seri ba lantılarına, akım seviyelerini yükseltmek için ise paralel ba lantılarına gerek olabilir. Gerekli ba lantı yapılmadan önce her bir sargının polaritesi bilinmelidir.

➤ Bir sargıda endüklenen gerilimin polaritesi nokta (•) veya pozitif (+) ve negatif (-) i aretleri ile gösterilir. Noktalı terminalin (ucun) potansiyeli noktasız terminalden daha yüksektir. Polarite ile her bir sargıda endüklenen gerilimin di er sargılara göre ba ıl yönü de ifade edilmektedir.



## 2.2.1. deal Transformatör- Polarite



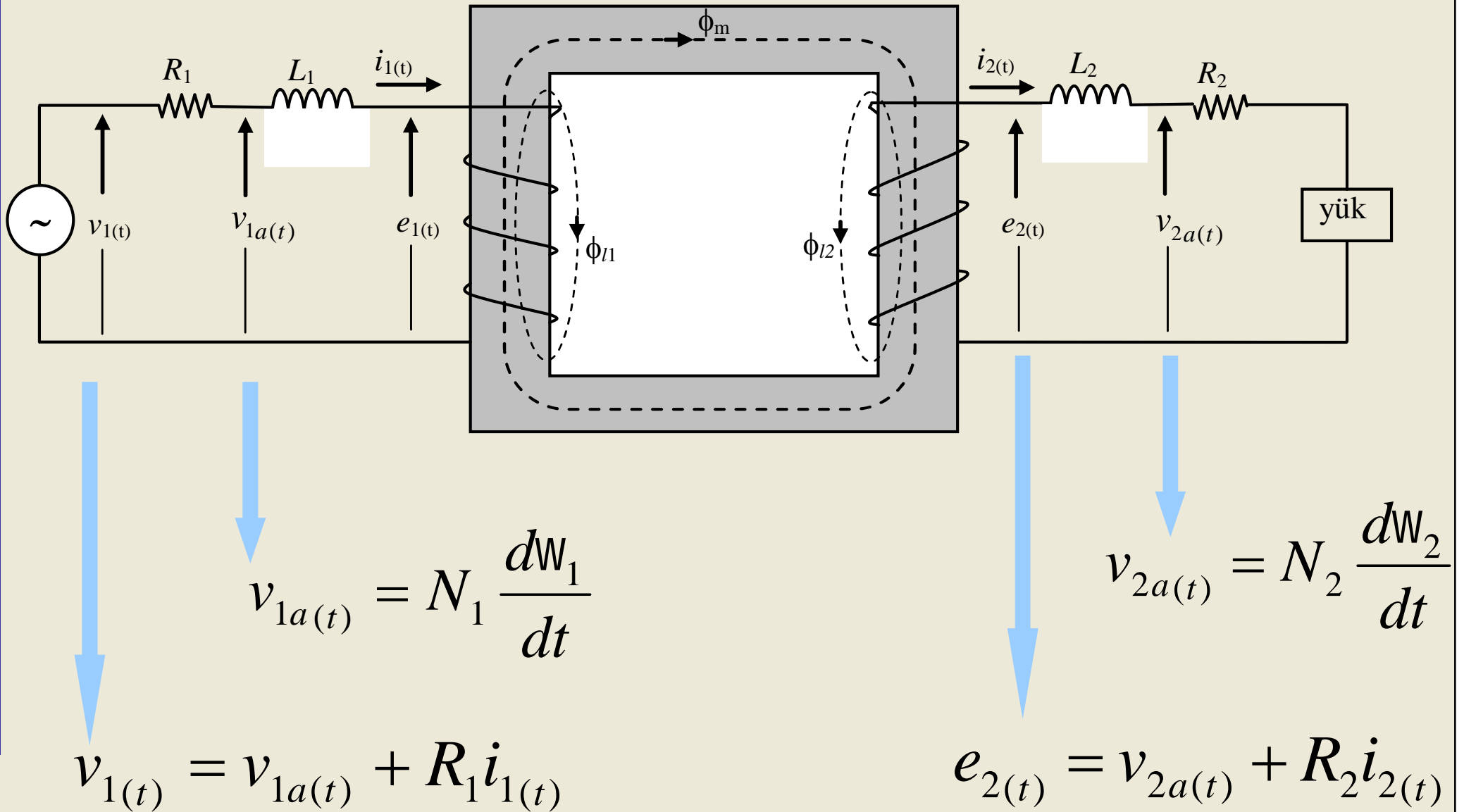
Transformatör sargılarının polariteleri (a) çıkı ve giri gerilimleri aynı fazdadır (b) çıkı gerilimi giri geriliminden  $180^\circ$  faz farklıdır, (c) polarite deneyi

## 2.2.2. Gerçek Transformatörler

- deal transformatör modeli sadece gerilim, akım ve empedans transformasyonlarını dikkate aldı ı için çok basittir. Bu kısımda daha gerçekçi bir transformatör modeli çıkarılacaktır.
- Primer ve sekonder sargılarının küçük de olsa dirençleri vardır ve sargılara seri ba lı olarak temsil edilirler. Sargı dirençlerinin ilave edilmesi neticesinde; terminal gerilimi endüklenen gerilime e it olmayacak, transformatör giri gücü çıkı gücünden daha büyük olacak ve verim %100'den küçük olacaktır.



## 2.2.2. Gerçek Transformatörler



## 2.2.2. Gerçek Transformatörler

➤  $W_1$  akısı primer sargısını keser. Eğer nüvenin geçirgenliği sonsuz kabul edilir ise, relüktans (manyetik direnç) sıfırdır ve böylece sadece demir nüve yolundan devresini tamamlar. Bu durumdan farklı olarak  $W_1$ 'in çok küçük bir oranı hava aralından devresini tamamlar (kaçak  $W_{l1}$ ), sekonder sargısını kesmez ve  $L_1$  kaçak endüktansı veya  $X_1$  kaçak reaktansı ile temsil edilir. Geri kalan akı  $W_m$  hem primer hem sekonder sargılarını kesen demir nüvedeki ortak akıdır.

$$W_1 = W_{l1} + W_m$$

$$v_{1(t)} = R_1 i_{1(t)} + N_1 \frac{dW_{l1}}{dt} + N_1 \frac{dW_m}{dt}$$

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = N_1 \frac{dW_{l1}}{dt}$$

$$e_1 = N_1 \frac{dW_m}{dt}$$

$$v_{1(t)} = R_1 i_{1(t)} + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_{1(t)}$$

## 2.2.2. Gerçek Transformatörler- Uyartım devresi

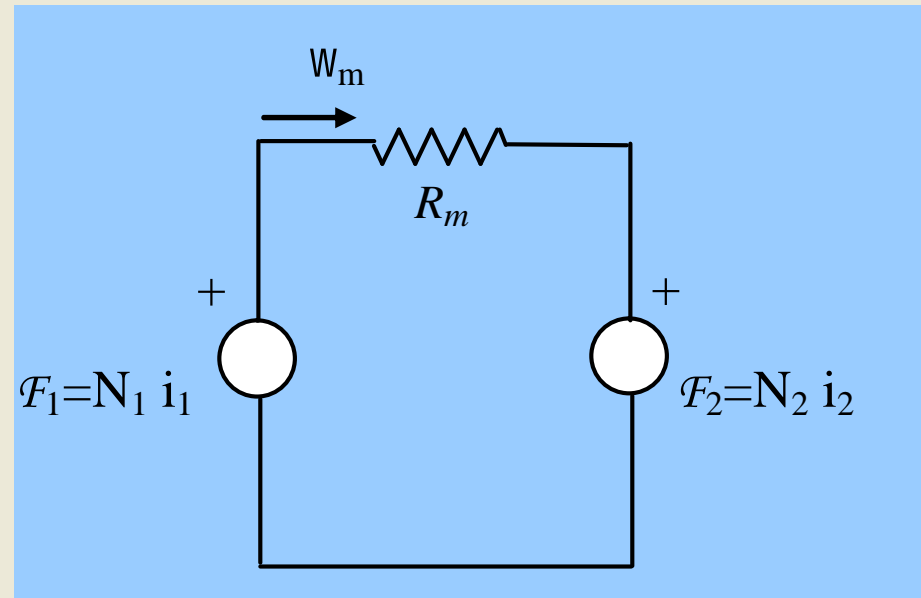
$$W_m R_m = N_1 i_1 - N_2 i_2$$

$$W_m R_m = i_w N_1$$

$$N_1 i_w = N_1 i_1 - N_2 i_2$$

$$i_1 = i_w + \frac{N_2}{N_1} i_2$$

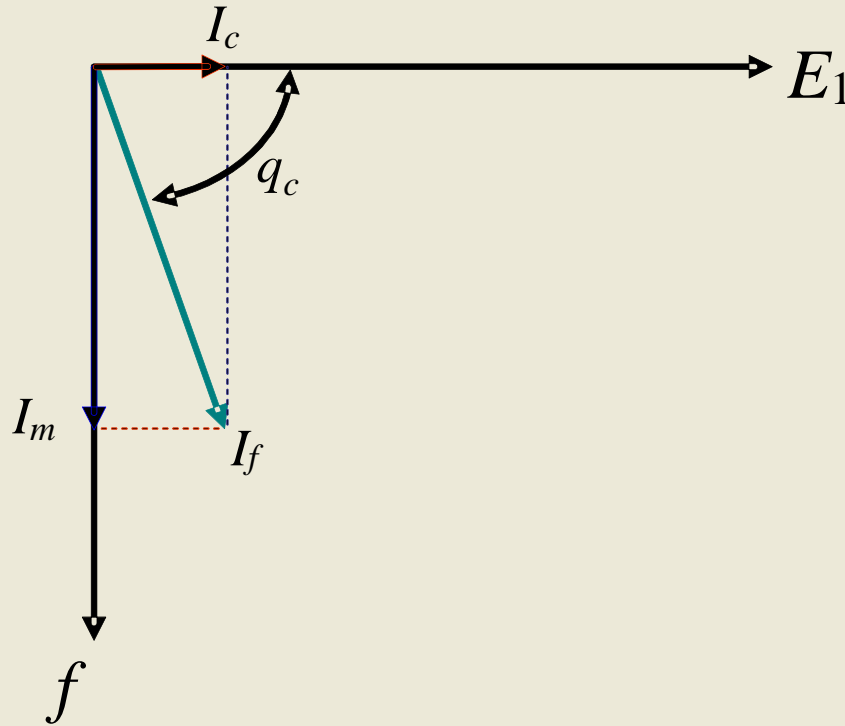
$$i_1 = i_w + i_2'$$



Primer akımı, uyartım akımı ile primere aktarılmı sekonder akımının toplamı olarak ifade edilebilir.

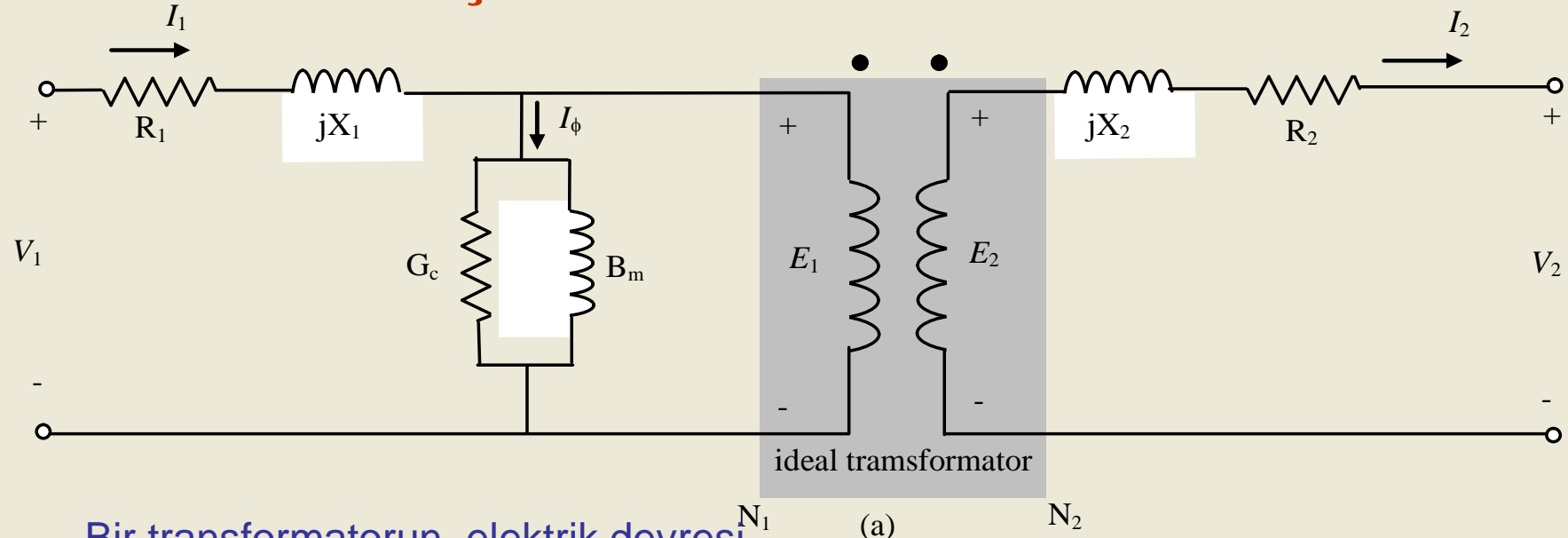
## 2.2.2. Gerçek Transformatörler- Uyartım akımı

Uyartım akımı nüvede kullanılan manyetik malzemenin histerisis e risinden dolayı sinüsoidal de ildir. Ancak burada uyartım akımının sadece temel dalga bile eni dikkate alınarak i lemler yapılacaktır.

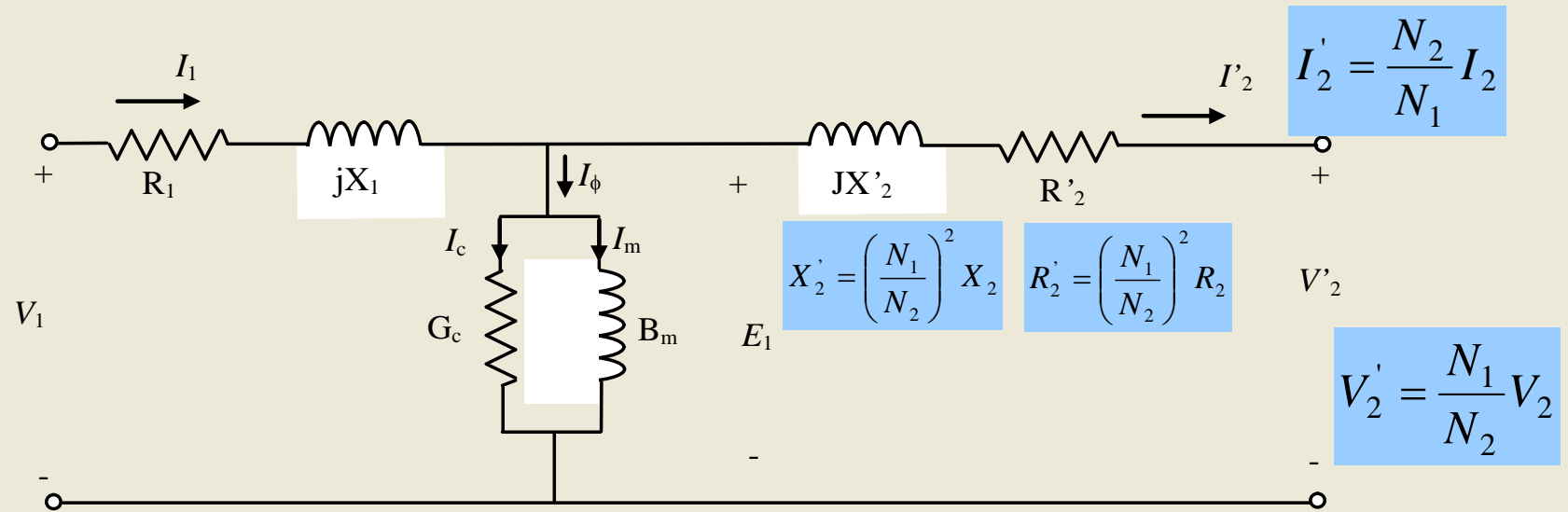


Uyartım akımının fazör diyagramı

## 2.2.2. Gerçek Transformatörler- E de er devre



Bir transformatörün elektrik devresi



Bir transformatörün T- e de er devresi

(b)

## 2.2.2. Gerçek Transformatörler- Performans

Belirli bir uygulama için uygun transformatörün seçimi önemli performans ölçütlerinin de erlendirilmesini gerektirir.

Önemli performans ölçütleri:

- **Gerilim regülasyonu:** Sabit bir güç katsayısında yükün sıfırdan anma de erine kadar de i mesi sonucu sekonder gerilimindeki de i imdir.

$$\%VR = \frac{V_2(\text{yüksüz}) - V_2(\text{anma})}{V_2(\text{anma})} \times 100$$

- **Verim:** Transformatörün çıkı gücünün giri gücüne oranıdır.

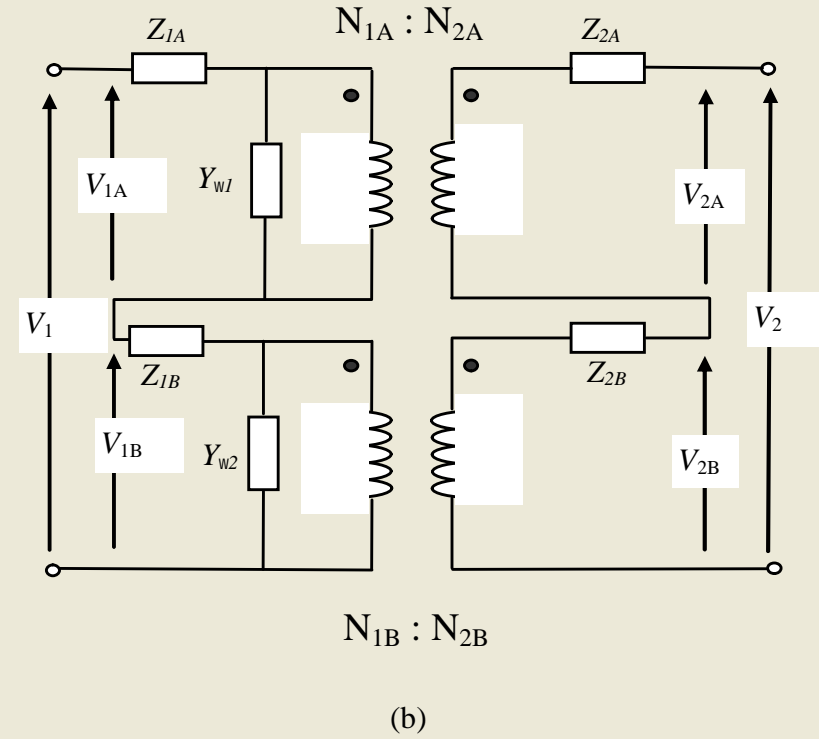
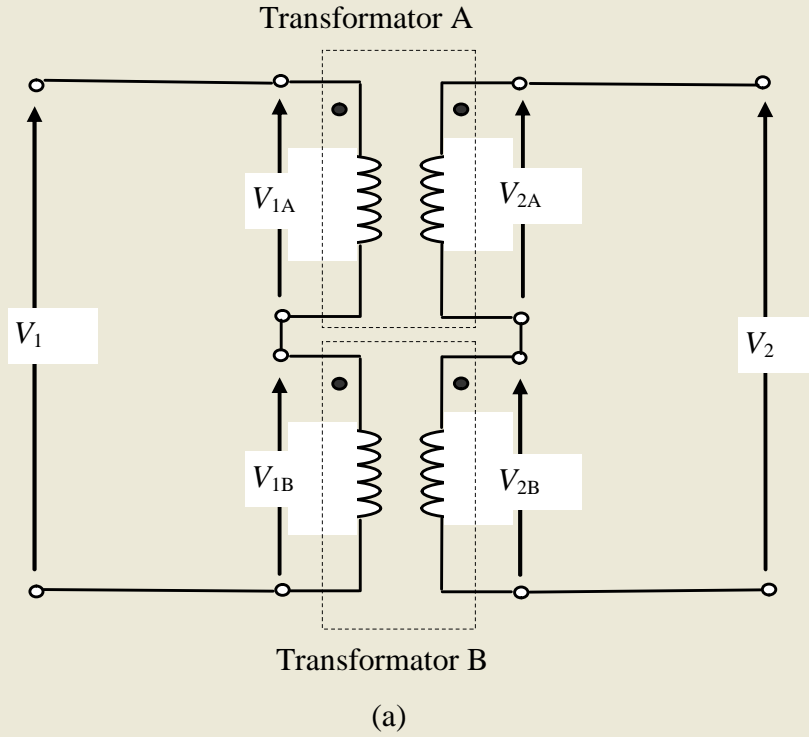
$$y = \frac{P_2}{P_1} \quad P_2 = V_2 I_L \cos \phi_L \quad P_1 = P_2 + P_l \quad P_l = P_c + I_L^2 (R_{eq})$$

$$y = \frac{V_2 I_L \cos \phi_L}{V_2 I_L \cos \phi_L + P_c + I_L^2 (R_{eq})}$$

### 2.2.3. Tek Fazlı Transformatörlerin Bağlantıları

- Bir fazlı transformatörler çeşitli şekillerde bağlanabilirler. Burada, iki adet bir fazlı (A ve B olarak) transformatörün seri ve paralel bağlantıları üzerinde durulacaktır.
- Seri bağlantı: İki transformatörün primerleri kendi aralarında seri bağlanırken sekonderleri de kendi aralarında seri bağlanabilirler. Böylece sargı gerilimlerinin toplamı veya farkı olan giriş ve çıkış gerilimleri elde edilebilir.
- Paralel bağlantı: Transformatörlerin paralel bağlanma nedenlerinden önemlileri:
  - Artan güç ihtiyacının karşılanması,
  - Aşırı yüklenmelerden dolayı aşırı ısınmadan sakınmak,
  - En yüksek enerji verimliliğinde çalışmak olarak belirtilebilir.

## 2.2.3. Transformatörlerin Ba lantıları- Seri Ba lantı



- $V_1$  gerilimi  $V_{1A}$  ve  $V_{1B}$  gerilimlerinin toplamına,  $V_2$  ise  $V_{2A}$  ve  $V_{2B}$  gerilimlerinin toplamına e ittir.
- Primer akımı her iki transformatörün primer sargılarından, sekonder akımı da her iki transformatörün sekonder sargılarından geçerler. Sargılardan geçen akımın transformatörlerin anma de erlerini geçmemesine dikkat edilmelidir.
- Bu ba lantıda anma akımları birbirinden farklı olursa, toplam anma gücü azaltılmı olur.

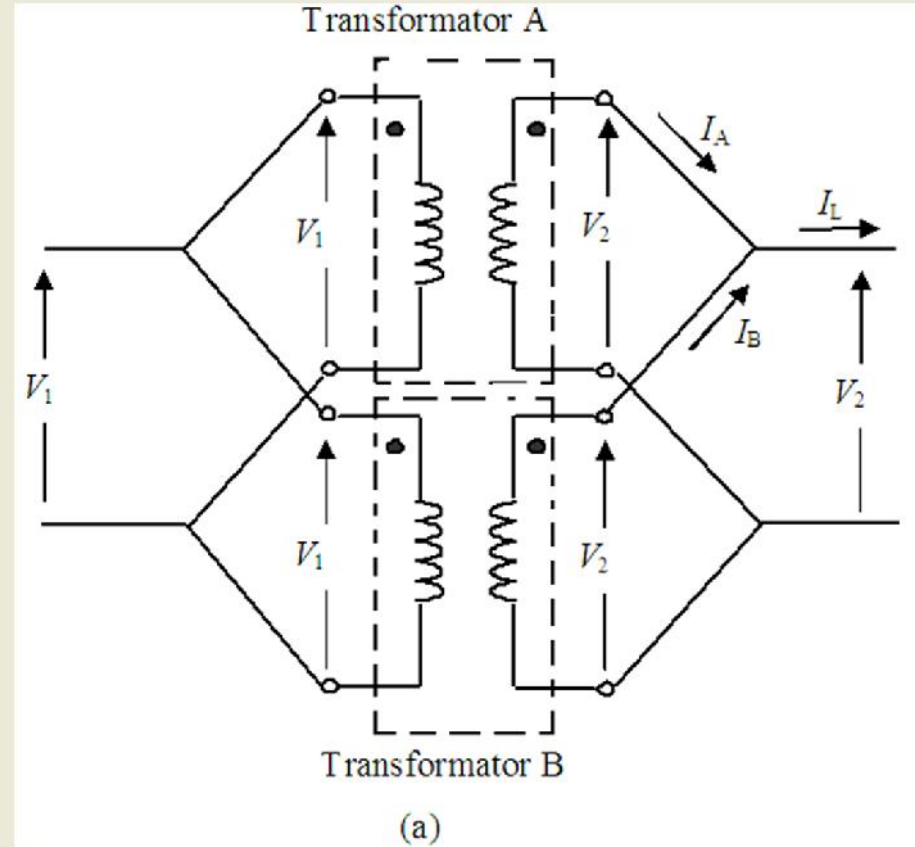


## 2.2.3. Transformatörlerin Ba lantıları- Paralel Ba lantı

Paralel ba lanacak transformatörlerde belirli artların yerine getirilmesi gerekir:

- Gerilim oranları aynı olmalıdır. Böylece transformatörler arasında sirkülasyon akımının oluşması sağlanır.
- Per-unit empedansları eşit olmalıdır.
- $R/X$  oranı her iki transformatör için de aynı olmalıdır.
- Üç-fazlı transformatörler için faz sıraları ve faz farkları aynı olmalıdır.

Bu artlar ancak ideal durumlarda gerçekleştirilebilir, pratikte tamamen gerçekleştirilemez.



$$I_A = \frac{I_L Z_{eq}}{Z_A} = \frac{\Delta V}{Z_A}$$

$$I_B = \frac{I_L Z_{eq}}{Z_B} = \frac{\Delta V}{Z_B}$$

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B}$$

$$\Delta V = \frac{V_1}{a} - I_L Z_L$$

$$I_L = I_A + I_B$$

## **2. Bölüm: Transformatörler**

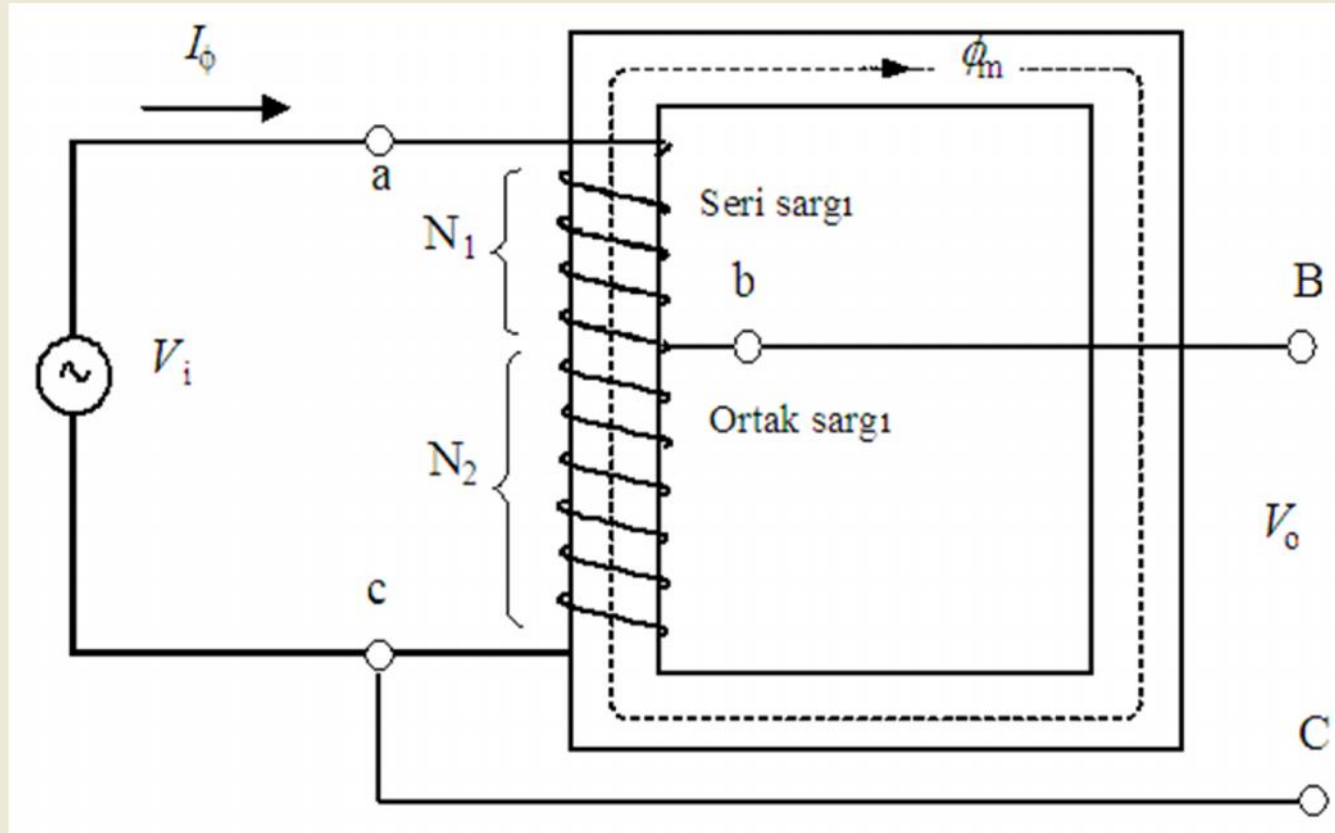
### **2.3. Ototransformatörler**

## 2.3. Ototransformatörler

- Standart transformatörler iki sargılı olmalarına karşılık ototransformatörler sadece bir sargılıdırlar ve bu sargının orta ucu da ayrı çıkartılır.
- Bir-fazlı veya üç-fazlı olarak üretilmektedirler.
- Ototransformatörler, genellikle düşük güç uygulamalarında ayarlı gerilim sağlamak için kullanılırlar. Endüstride; asenkron motorlara düşük gerilimle yol verme, üç-fazlı sistemlerde nötr oluşturma, küçük motorların hız kontrolü, gerilimin yükseltilmesi veya düşürülmesi kullanılma yerlerine örnek olarak verilebilir.

## 2.3. Ototransformatörler

Ototransformatörün temel ilkesi, sargıların elektriksel olarak iç bağlantılarına izin verilmesidir. Burada, şekilde verilen ve bir demir nüve üzerine sarılmış  $N$  sarımlı bir ototransformatör sargısı üzerinde durulacaktır. b ara ucunun d1 arı çıkarıldı 1 ve a-b uçları arasında kalan kısımda  $N_1$  sarım sayısının, b-c arasında kalan kısımda ise  $N_2$  sarım sayısının olduğu kabul edilecektir.

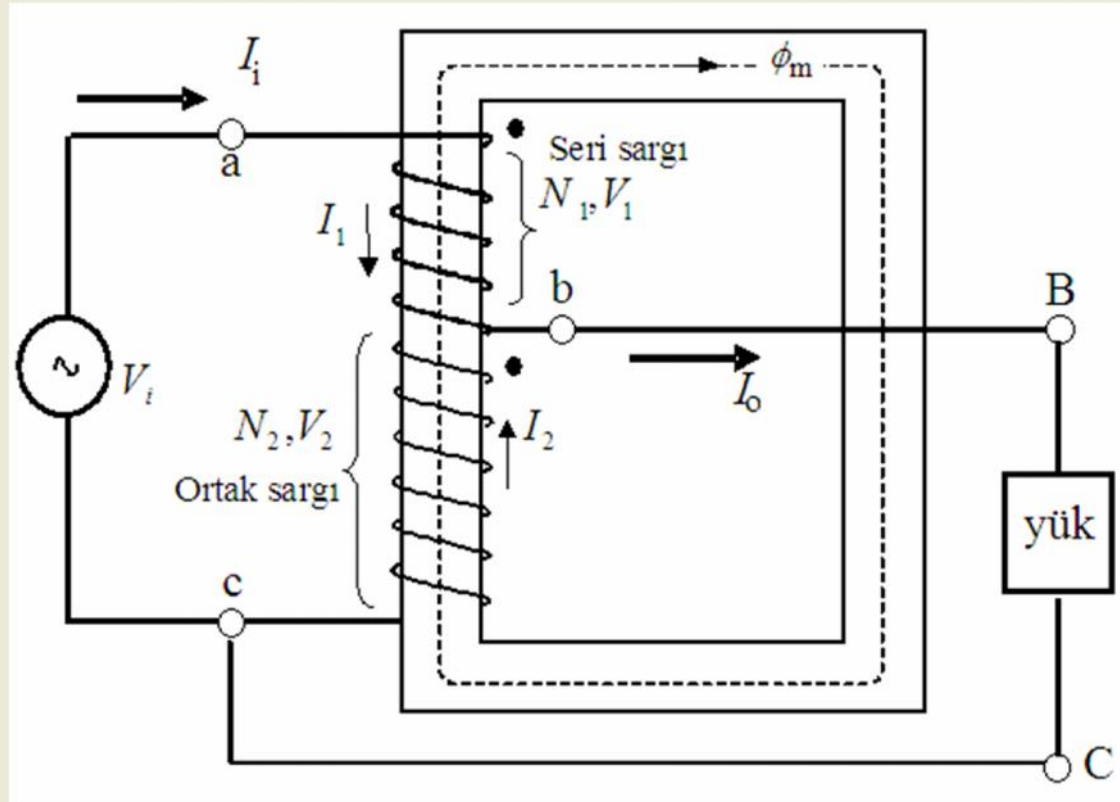


## 2.3. Ototransformatörler

- Sargının a-b arasında yer alan kısmı devreye seri ba lı oldu undan “seri sargı” olarak adlandırılır.
- Sargının b-c uçları arasında kalan kısmı ise hem yüke hem de kayna a ortak oldu undan “ortak sargı” olarak adlandırılır. Ancak giri uçları a-c ile çıkı uçları b-c birbirlerinden elektriksel olarak yalıtılmamı tır. Çünkü c ucu hem giri hem de çıkı uçlarına ortaktır.
- Bu basit sargı, açıkça bir ototransformatörü meydana getirmektedir. Bu düzenleme sonucu elde edilen ototransformatöre, iki-sargılı transformatör kuralları uygulanabilecektir.

## 2.3. Ototransformatörler

a-c giri uçlarına bir alternatif akım (AA) kaynağı  $V_i$  bağlanır. Kaynaktan çekilen  $I_f$  uyartım akımını nüvede bir AA akısı  $\phi_m$  meydana getirir. Manyetik akı hem  $N_1$  hem de  $N_2$  sargılarını keser. Böylece bu sargılarda, sarım sayıları ile orantılı gerilimler endüklenir. Uyartım akımını küçük olduğu için genellikle ihmal edilir ve böylece ideal ototransformatör kuralları uygulanabilir.



Primerinde  $N_1$ , sekonderinde  $N_2$  sarım sayısı olan bir ototransformatör-Gerilim düşürücü

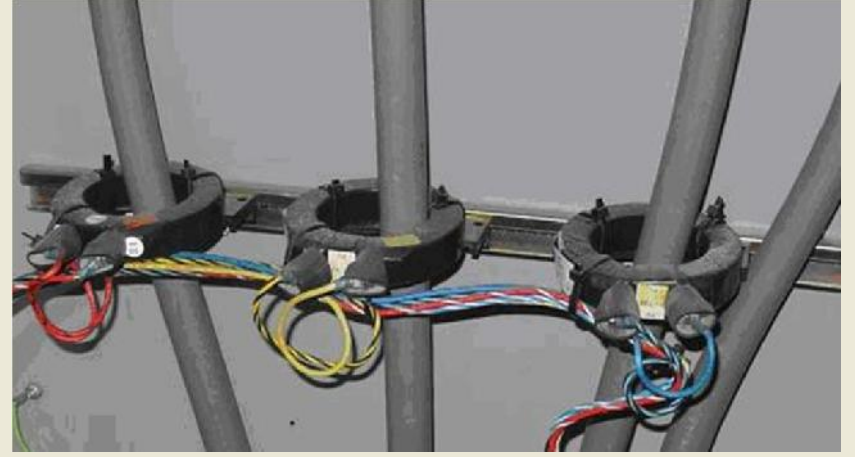
## **2. Bölüm: Transformatörler**

### **2.4. Ölçüm Transformatörleri**

## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

### G R

Ölçü transformatörleri, bir güç sisteminde yüksek gerilim ve akımların standart düşük ölçme aralıklı voltmetreler ve ampermetreler ile ölçülmesi ve izlenmesi amacıyla tasarlanır.



Ölçü transformatörlerinin primer ve sekonderleri arasında elektriksel yalıtımın bulunması, bu ölçmeler yapılırken aynı zamanda gerekli emniyeti de sağlarlar.

Bunun için ölçü transformatörleri, yüksek gerilim ve akımları standart ölçü aletlerinin ölçme aralığına uygun seviyelere düşürürler. Ölçü transformatörleri genellikle gerilim ve akım transformatörleri olarak sınıflandırılabilir.



## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

### Gerilim transformatörleri:

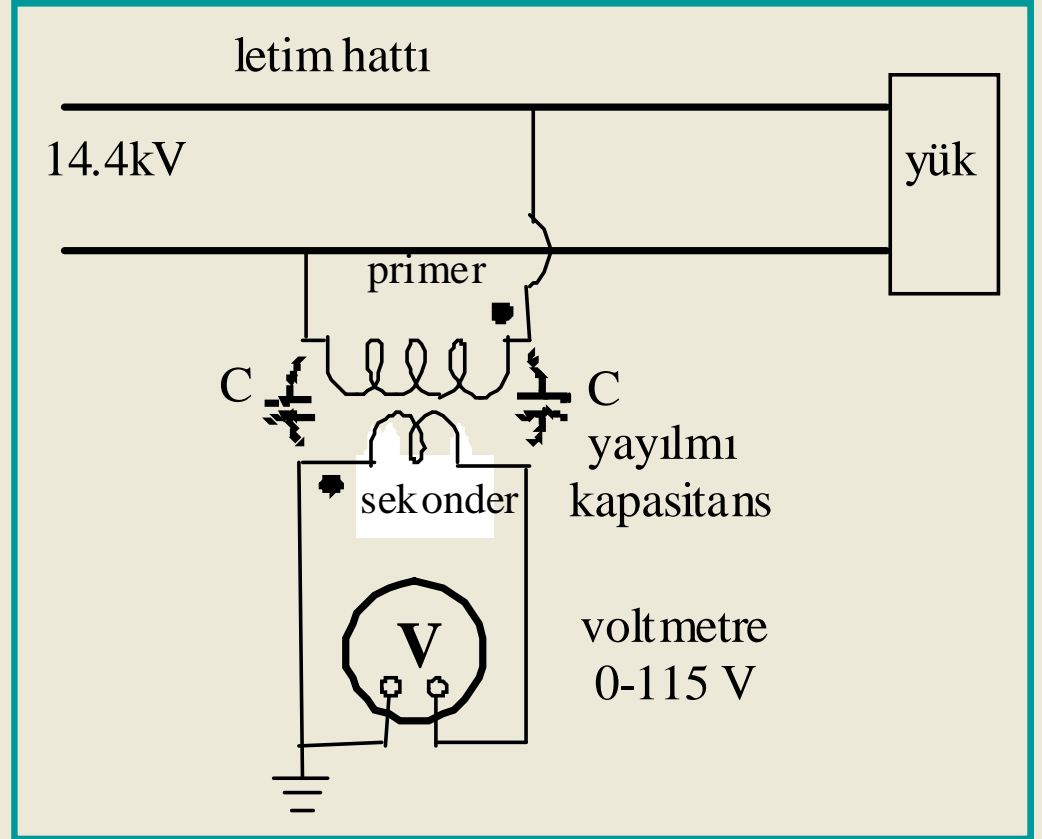
- İletim hatlarının gerilimlerini ölçmek ve izlemek,
- Ölçü aletlerini iletim hatlarından yalıtmak için kullanılırlar.
- Değişik güçlerde üretilirler.



- Yüksek hassasiyetli transformatörlerdir. Primer geriliminin sekonder gerilimine oranı sabit olarak bilinir ve yükle çok az değişir. Ayrıca, sekonder gerilimi primer gerilimi ile tam olarak aynı fazda sayılabilir.
- Sekonder gerilimin anma değeri genellikle 115V veya 120V'dur ve iletim hattına paralel olarak bağlanan primerin anma gerilim değerine bağlıdır. Bu gerilim seviyesi standart ölçü aletleri ve rölelerin sekonder uçlarına bağlanmasını sağlar.

## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

Gerilim transformatörlerinin yapısı klasik transformatörlere benzerdir. Fakat, primer ile sekonder arasındaki yalıtım, yüksek gerilim hattı gerilimine dayanacak şekilde olmalıdır. Bu amaçla sekonder sargının bir ucu topraklanır.



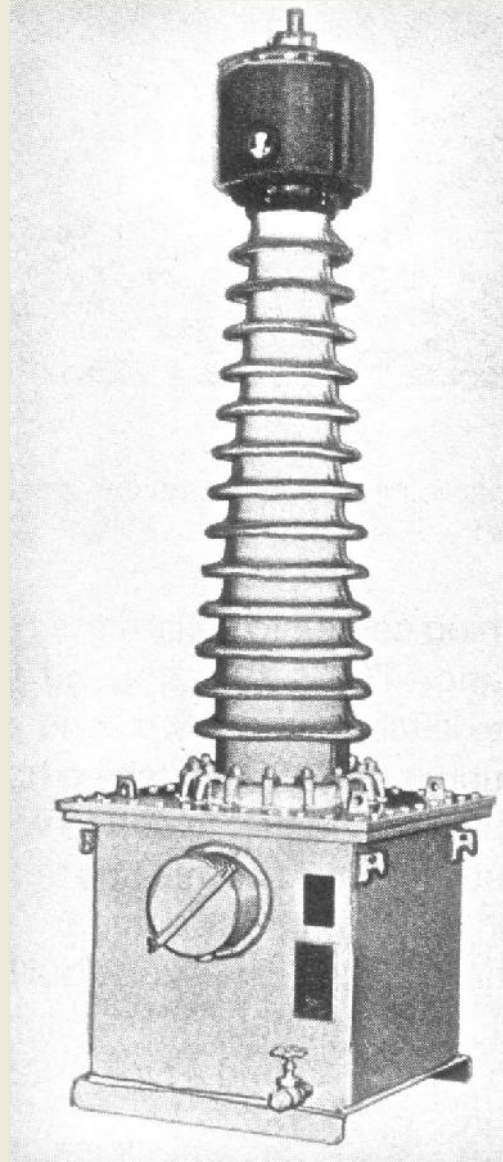
Böylece sekonder uçların birisine dokunuldu unda ölüm oku tehlikesi önlenmi olur. Sekonder, primerden yalıtılmı gibi görünmesine ra men iki sargı arasındaki “yayılmı kapasitans” görünmeyen bir ba lantı sa lar. Bu görünmeyen ba lantı sekonder sargı ve toprak arasında yüksek bir gerilim üretir. Sekonder sargının bir ucu topraklanarak sekonder sargı ile toprak arasındaki en yüksek gerilim 115V’a sınırlanmı olur.

## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

Gerilim transformatörlerinin anma güçleri genellikle 500VA 'den azdır.

Yalıtım için kullanılan hacim, bakır veya çelik hacminden çok daha büyüktür.

Yüksek gerilim hatlarına ba lanan gerilim transformatörleri daima hat-nötr (faz) gerilimini ölçerler. Faz gerilimlerinin ölçülmesi, iki yerine bir adet porselen izolatörün kullanılmasını sa lar. Çünkü primerin bir ucu topra a ba lanmı tır.



Primer ucu izolatörün en üstündeki hata ba lanır. Di er ucu topraklanır.

Sekonder iki adet 115 V sargıdan meydana gelir.

Hassasiyet: %0.3

Toplam yükseklik: 2565mm

Porselen izolatör yüksekli i: 1880mm

Ya : 250 litre

A ırlık : 740 kg

7000VA, 80.5kV, 50/60Hz gerilim (potansiyel) transformatörü

## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

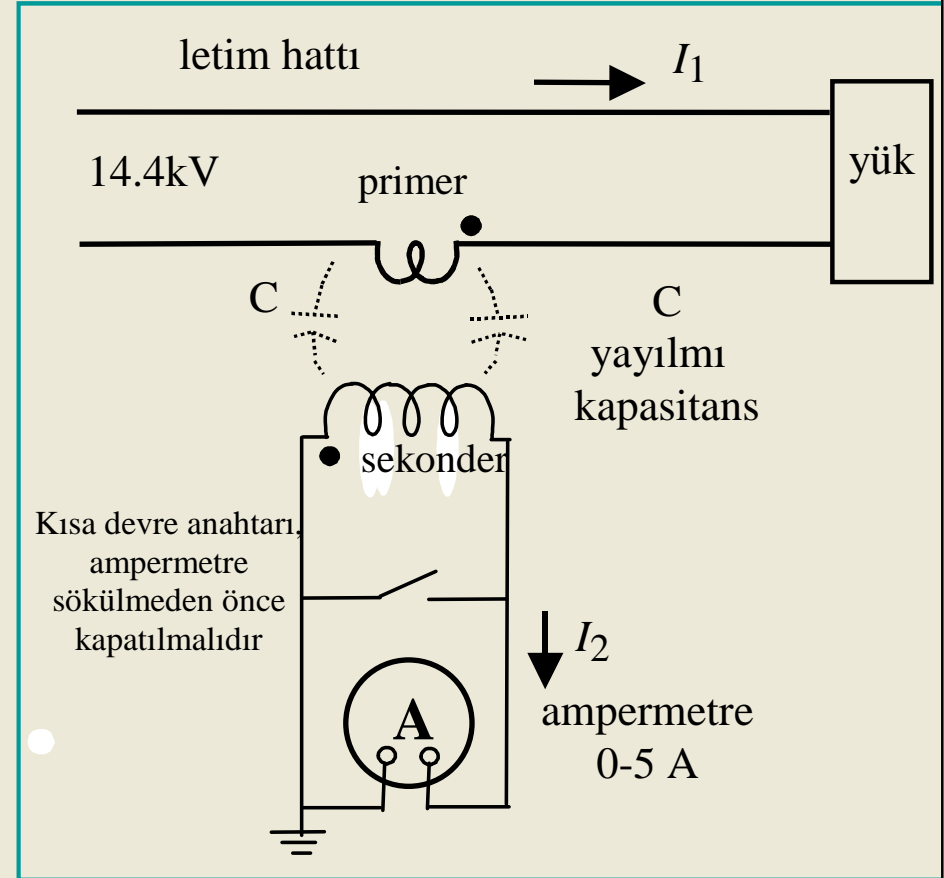
### Akım transformatörleri:

- Hat akımını ölçmek ve izlemek, sekonder uçlarına bağlanan ölçü aletlerini ve röleleri yalıtımlamak için kullanılırlar.
- Yüksek hassasiyetli transformatörlerdir.
- Primer-sekonder akımları oranı yük ile çok az değişir.
- Primer ve sekonder akımları arasındaki faz açısı çok küçüktür, genellikle bir dereceden daha küçüktür.
- Yüksek hassasiyetli akım oranı ve küçük faz açısı değerleri, uyarım akımı çok düşük tutularak gerçekleştirilir.



## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

- Akım transformatörünün primer sargısı hat ile seri olarak bağlanır.
- Sekonder akımı, primer akımının anma değerine bağlı olmaksızın, genellikle 5 amperdir.
- Etkilde ampermetreye paralel bağlı kısa devre anahtarı ampermetrenin sökülmesi gerektiğinde sekonder sargı uçlarını kısa devre etmek amacıyla konulmuştur.
- Akım transformatörleri ölçme ve sistem koruması için kullanıldıklarından güçleri küçüktür ve genellikle 15VA-200VA aralığındadır.



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = a$$

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

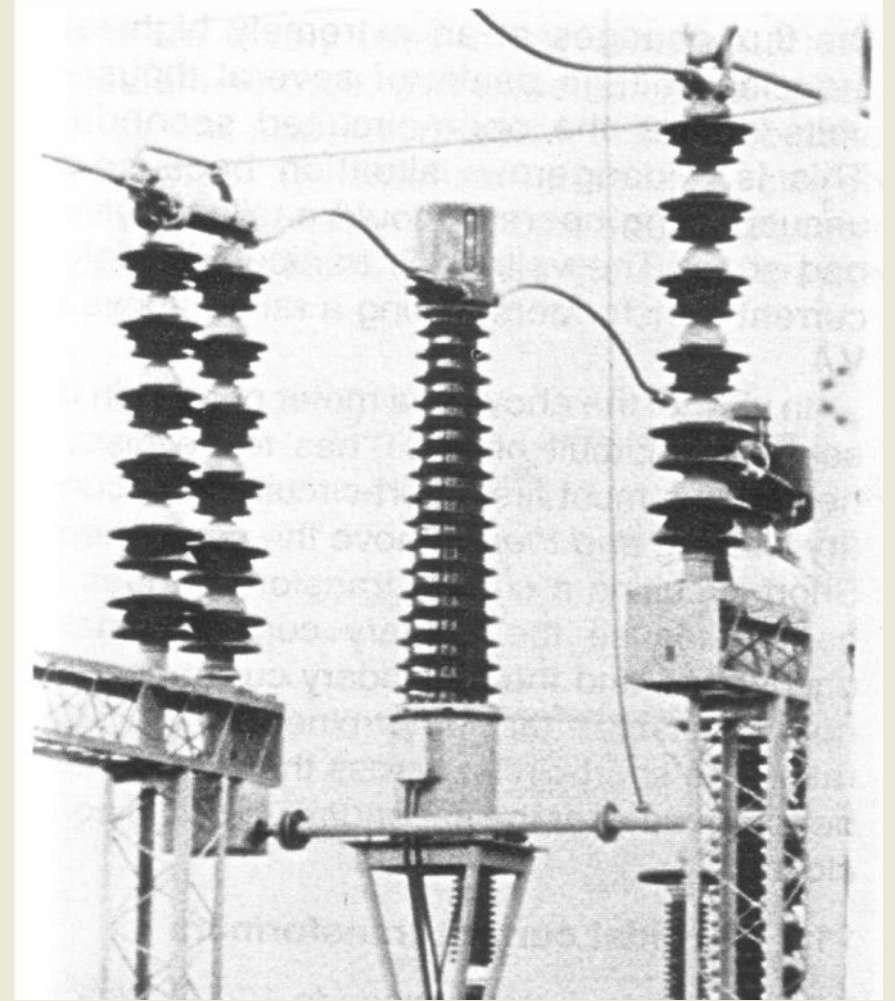


## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

Yüksek gerilim iletim hatlarında akım ölçülürken güvenlik nedeni ile akım transformatörleri muhakkak kullanılmalıdır.

Primer ve sekonder sargılar arasındaki yalıtım, yüksek gerilim hattının faz gerilimi ve gerilim dalgalanmalarına dayanacak şekilde yapılmalıdır.

Akım transformatörünün çalısı abilece i maksimum gerilim etiketinde gösterilir. Gerilim transformatöründeki aynı sebepten, akım transformatörünün da sekonder sargısının bir ucu topraklanmalıdır.



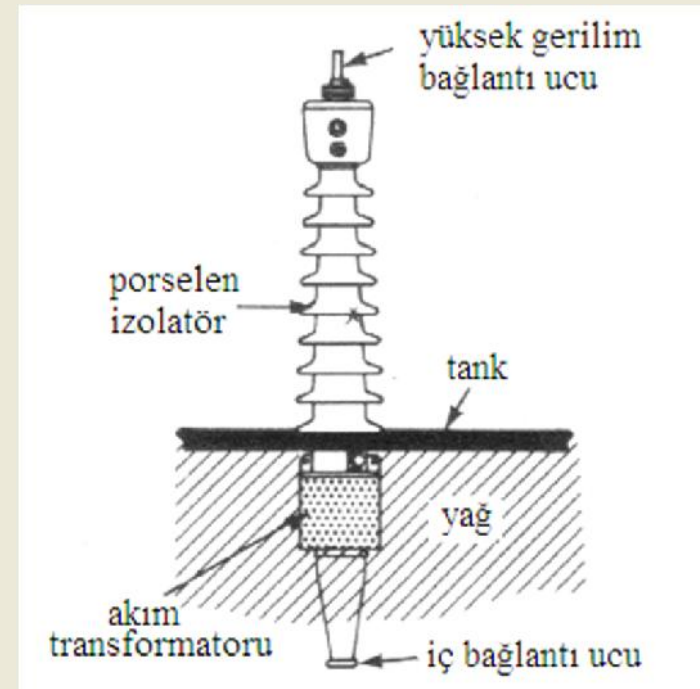
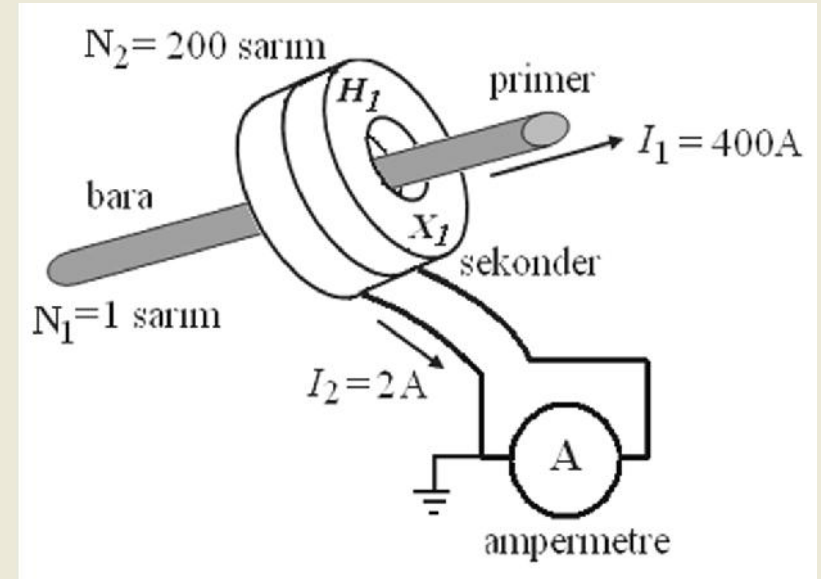
500VA, 100A/5A, 50Hz bir akım transformatörü. Bir yüksek gerilim istasyonunda 230kV hat gerilimine göre yalıtılmış ve % 0.6 hassasiyetli bir akım transformatörünün bir faza bağlantısı

## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

➤ Hat akımı 100A'ı geçti i zaman bazen toroidal akım transformatörleri kullanılır. Transformatör nüvesi bir yüzük gibi daireseldir, erit saçlardan daire ekinde yapılır.

➤ Sekonder sargı bu nüve üzerine sarılır. Primer ise genellikle sadece bir iletken meydana gelir. Bu iletken sekonderin ortasından (içerisinden) geçer.

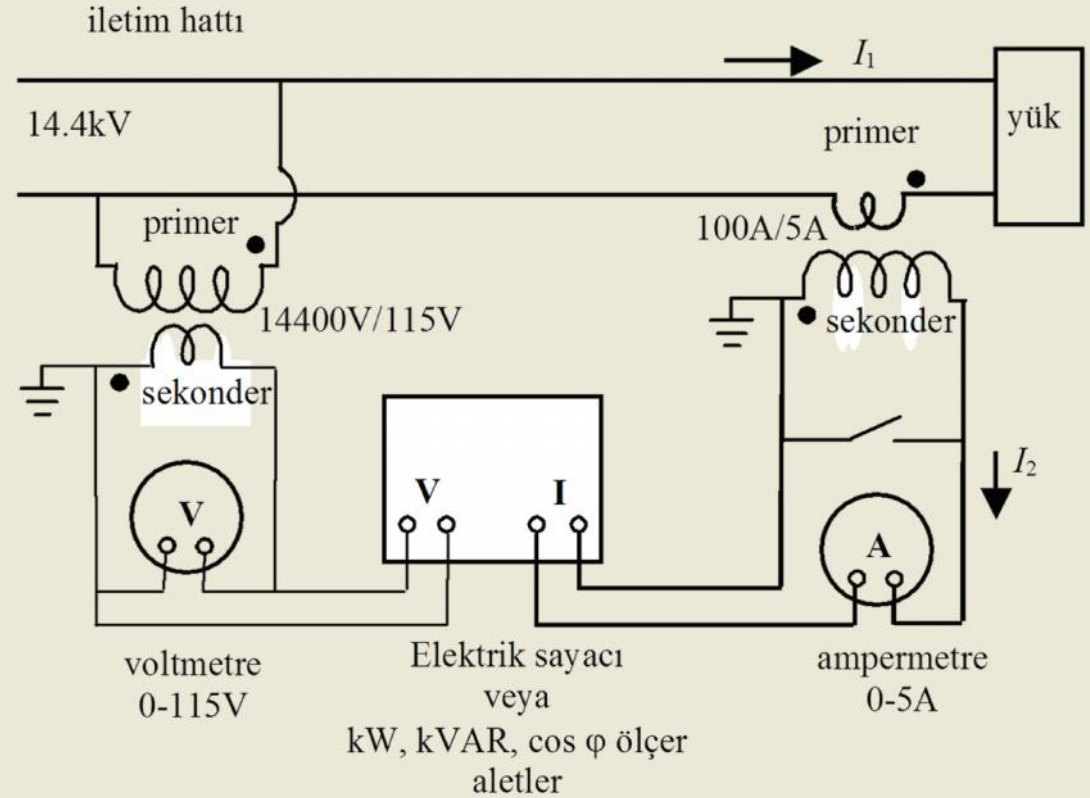
➤ Primer iletkenin pozisyonu (merkezde olması veya olmaması) çok önemli de ildir. Eğer sekonderde  $N$  sarım sayısı var ise, dönü türme oranı da  $N$  olur. Örnek: 1000A/5A bir toroidal akım transformatörünün sekonder sargı sarım sayısı  $1000/5 = 200$  olur.



## 2.4. Ölçüm Transformatörleri

➤ Yüksek hat gerilimi, gerilim transformatörü ile düşürülür. Voltmetre ve elektrik sayacının gerilim bobini gerilim transformatörünün sekonder uçlarına paralel bağlanır.

➤ Yüksek hat akımı bir akım transformatörü ile düşürülür. Ampermetre ve elektrik sayacının akım bobini akım transformatörünün sekonder uçlarına seri olarak bağlanır.





## **2. Bölüm: Transformatörler**

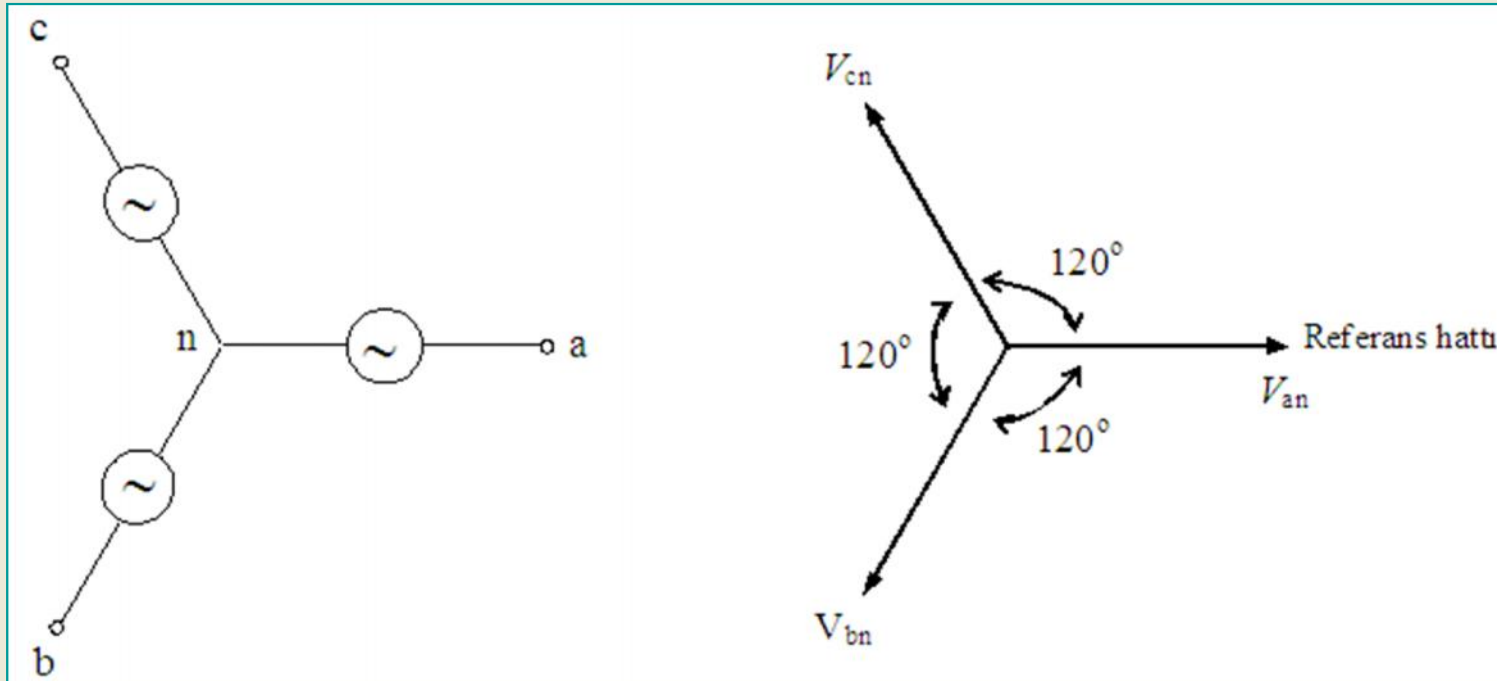
### **2.5. Üç Fazlı Transformatörler**

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörler

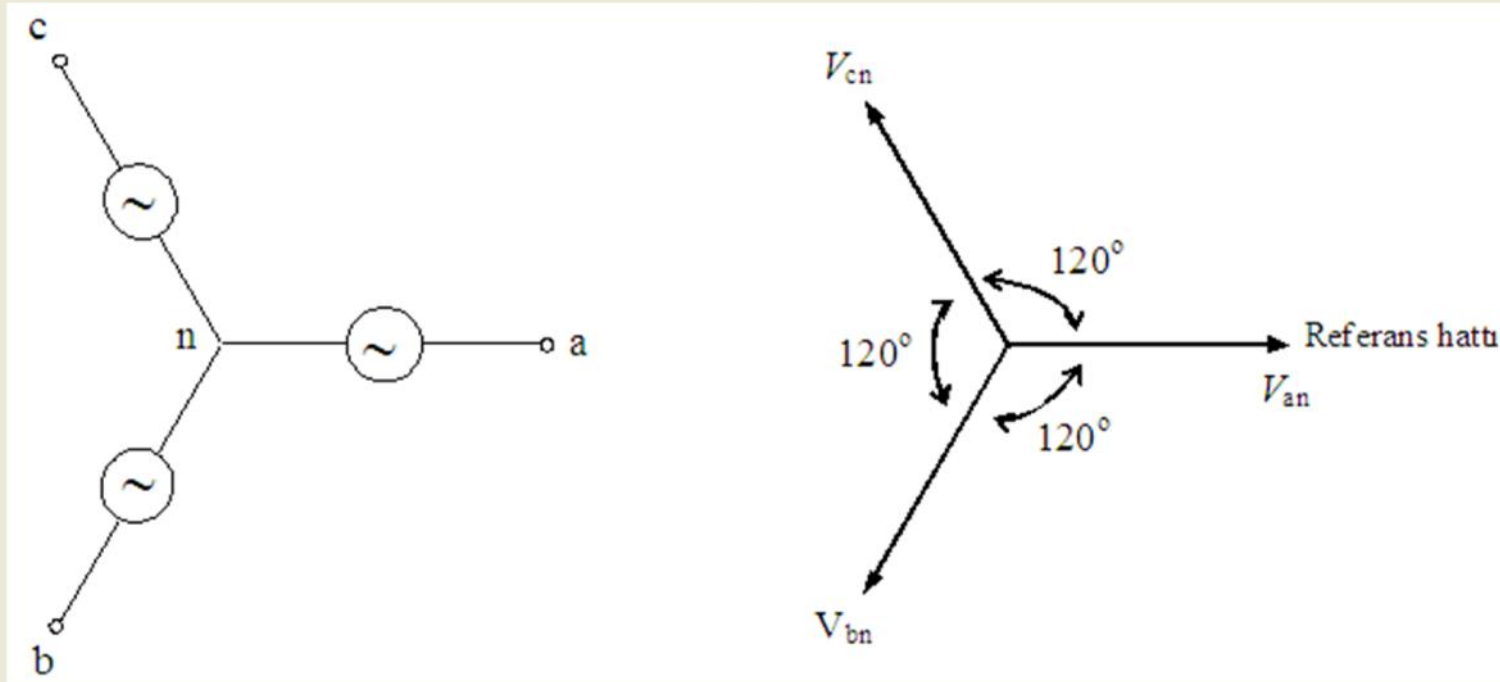
### G R

Günümüzde kullanılan elektrik enerjisinin büyük kısmı dengeli üç-fazlı gerilim sistemi kullanılarak üretilir, iletilir ve dağıtılır.

Üç-fazlı sistemlerin modern hayatta önemli bir yerinin olması, üç-fazlı sistemlerin ve transformatörlerin çalışmasını ve kullanılmasını anlamayı gerekli kılmaktadır. Dengeli üç-fazlı gerilim sistemi, gerilim genlikleri ve frekansları aynı, fakat fazları birbirinden  $120^\circ$  farklı olan üç ayrı fazdan meydana gelir.



## 2.5. Üç Fazlı Transformatörler - Y-ba lı



Y-ba lı 3-fazlı sistem ve fazör diyagramı

$$V_{an} = V_W \angle 0^\circ$$

$$V_{bn} = V_W \angle -120^\circ$$

$$V_{cn} = V_W \angle -240^\circ$$

$$= V_W \angle 120^\circ$$

$$V_{ab} = V_{an} + V_{nb}$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$|V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| = V_W$$

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_W \angle 30^\circ$$

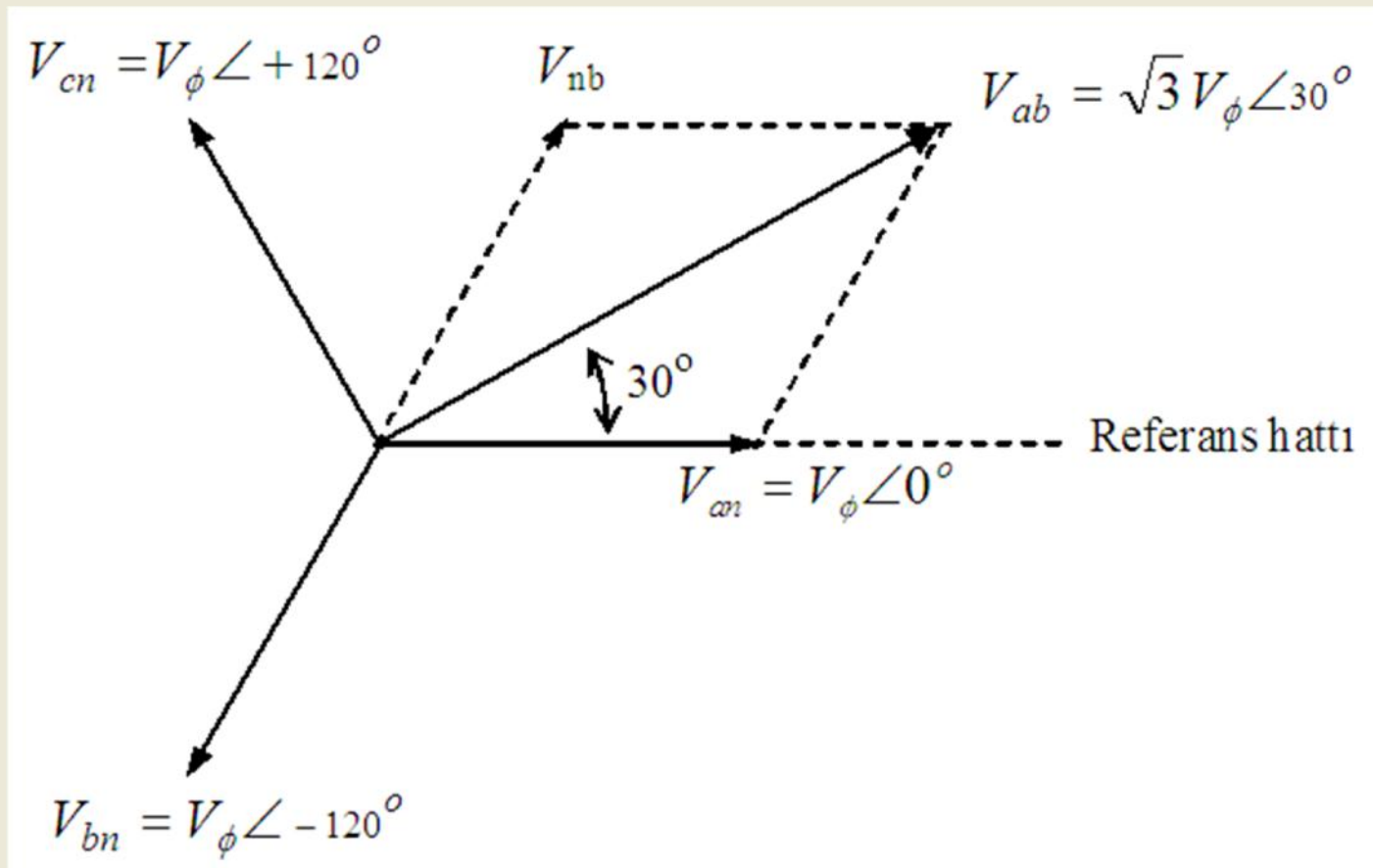
$$V_{bc} = \sqrt{3} V_W \angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = \sqrt{3} V_W \angle 150^\circ$$

$$V_L = \sqrt{3} V_W$$

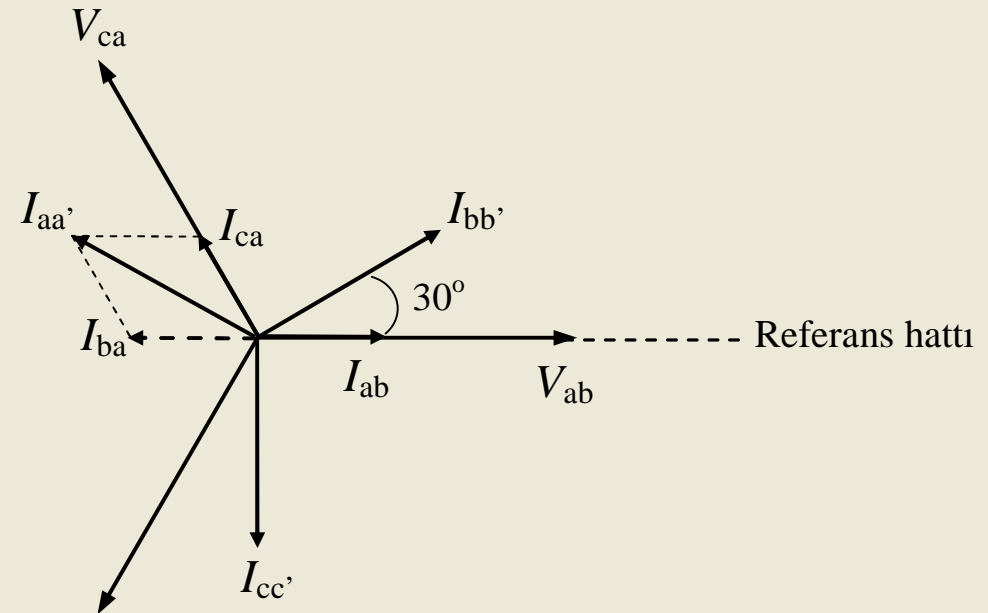
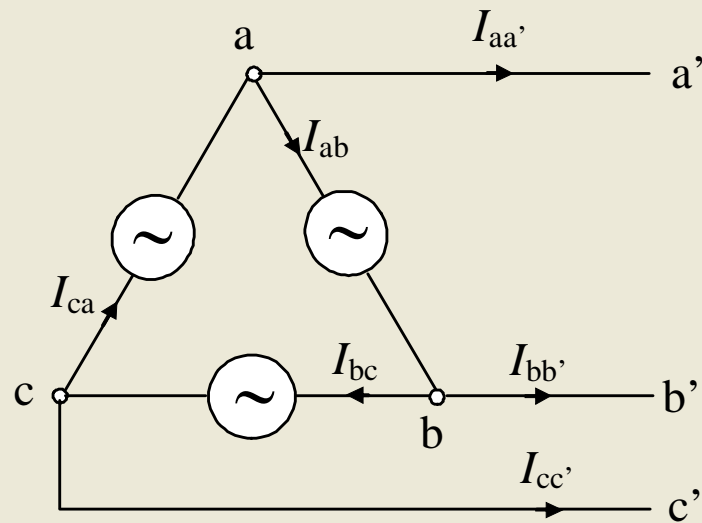
## 2.5. Üç Fazlı Transformatörler - Y-ba lı

$$I_L = I_W$$



Y-ba lı 3-fazlı sistemde faz ve hat gerilimleri arasındaki genlik ve faz ilişkileri

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörler - Δ-ba lı



Δ-ba lı 3-fazlı sistemde faz ve hat akımları arasındaki genlik ve faz ilişkileri

$$I_{ab} = I_w \angle 0^\circ$$

$$I_{bc} = I_w \angle -120^\circ$$

$$I_{ca} = I_w \angle +120^\circ$$

$$I'_{aa} = I_{ca} - I_{ab}$$

$$I'_{aa} = I_w (1 \angle +120^\circ - 1 \angle 0^\circ)$$

$$I'_{aa} = \sqrt{3} I_w \angle +150^\circ$$

$$I'_{bb} = \sqrt{3} I_w \angle +30^\circ$$

$$I'_{cc} = \sqrt{3} I_w \angle -90^\circ$$

$$I_L = \sqrt{3} I_w$$

$$V_L = V_w$$

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Güç Ba ıntıları

$$v_{a(t)} = \sqrt{2} V_w \sin(\check{S}t)$$

$$v_{b(t)} = \sqrt{2} V_w \sin(\check{S}t - 120^\circ)$$

$$v_{c(t)} = \sqrt{2} V_w \sin(\check{S}t - 240^\circ)$$

$$i_{a(t)} = \sqrt{2} I_w \sin(\check{S}t - \{ \})$$

$$i_{b(t)} = \sqrt{2} I_w \sin(\check{S}t - \{ -120^\circ \})$$

$$i_{c(t)} = \sqrt{2} I_w \sin(\check{S}t - \{ -240^\circ \})$$

Faz büyüklükleri ile güç denklemi:

$$P_{3W(t)} = 3V_w I_w \cos \{$$

$$Q_{3W(t)} = 3V_w I_w \sin \{$$

$$S_{3W(t)} = 3V_w I_w$$

Hat büyüklükleri ile güç denklemi:

$$P_{3W(t)} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \{$$

$$Q_{3W(t)} = \sqrt{3} V_L I_L \sin \{$$

$$S_{3W(t)} = \sqrt{3} V_L I_L$$

Toplam görünür güç:

$$S_{3W} = P_{3W} + jQ_{3W}$$

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörler

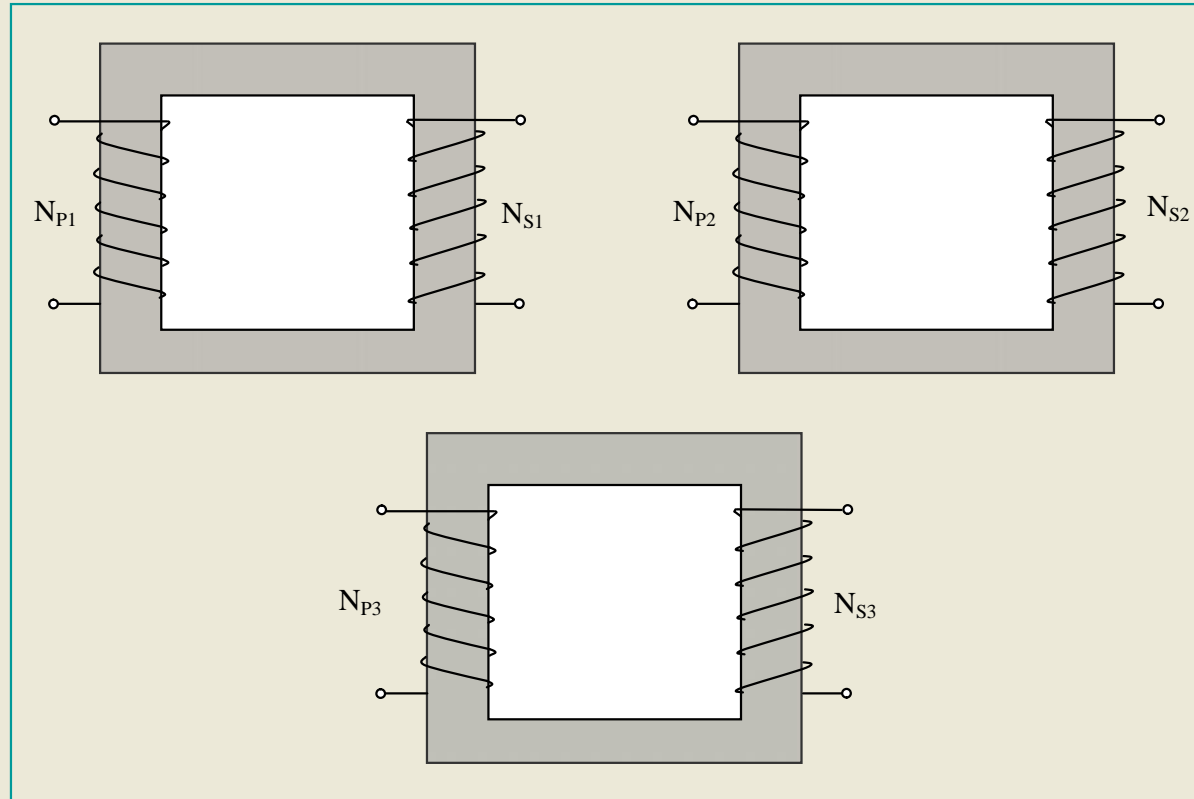
Günümüzde kullanılan elektrik enerjisinin büyük kısmı dengeli üç-fazlı gerilim sistemi kullanılarak üretilir, iletilir ve dağıtılır. Üç-fazlı sistemlerin modern hayatta önemli bir yerinin olması ve enerjinin iletim ve dağıtımında üç-fazlı transformatörlerin kullanılması üç-fazlı transformatörlerin özelliklerini anlamayı gerekli kılmaktadır.



## 2.5. Üç Fazlı Transformatörler

### ÜÇ-FAZ TRANSFORMATOR BANKASI

Üç-fazlı devreler için üç-fazlı transformatörlerin yapımı iki eklede mümkündür. Birincisi, eklede gösterildi i gibi basit olarak üç adet bir-fazlı transformatörü üç-fazlı bir banka olarak ba lamaktır. Bu eski yakla ımın avantajı ise herhangi bir arıza durumunda ilgili transformatörün de i tirilebilme imkanının olmasıdır.



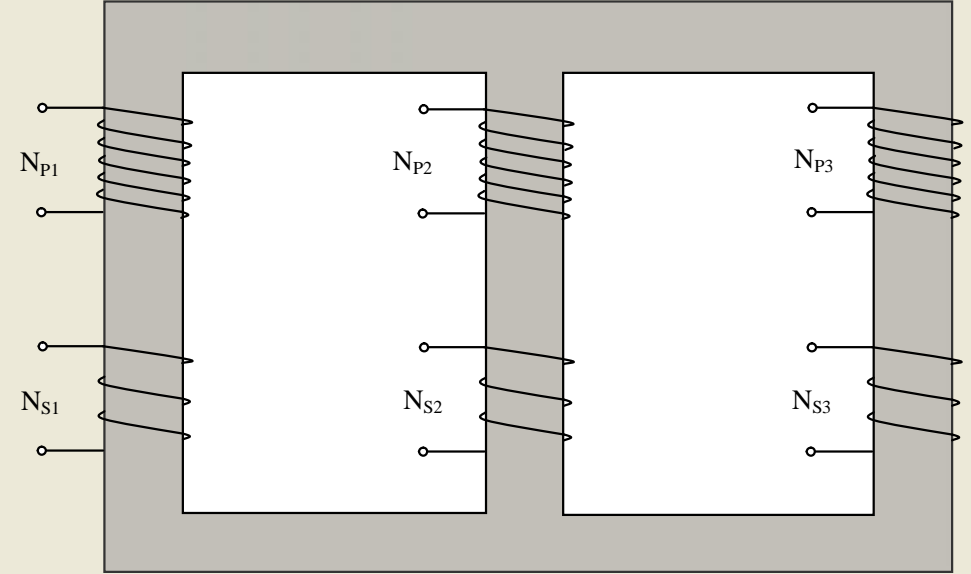
Üç adet birbirinden ba ımsız bir-fazlı transformatordan olu an 3-faz transformatör bankası



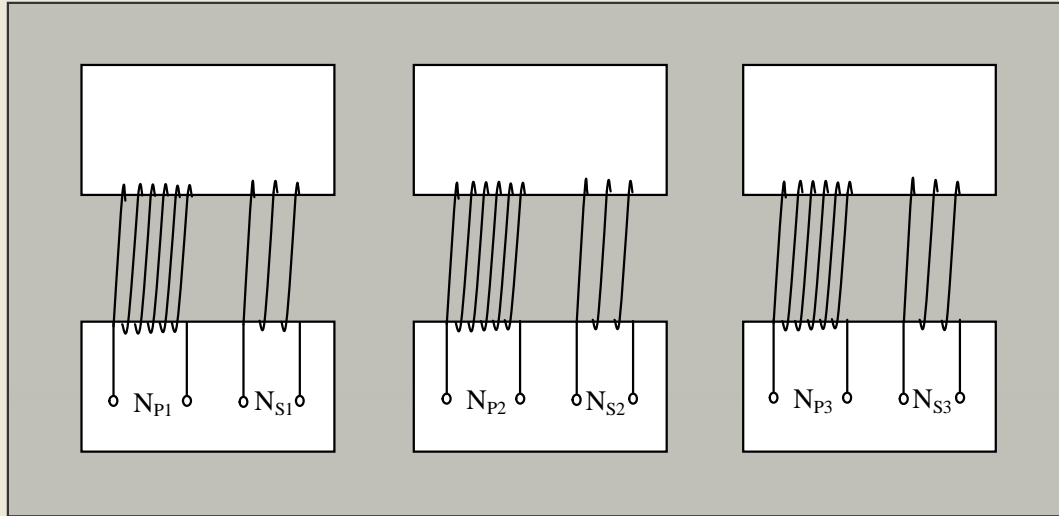
## 2.5. Üç Fazlı Transformatörler

### 3-FAZLI TRANSFORMATÖR

İkinci yaklaşım ise ekinde gösterildiği gibi ortak bir nüve üzerine üç-faz sargılarının sarmak olmuştur.



Çekirdek tipi nüve üzerine sarılmış üç-fazlı bir transformatör



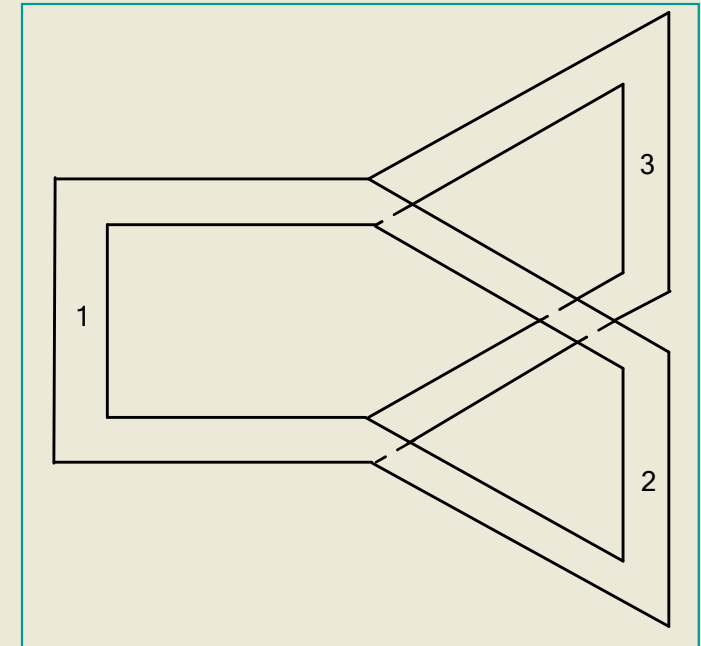
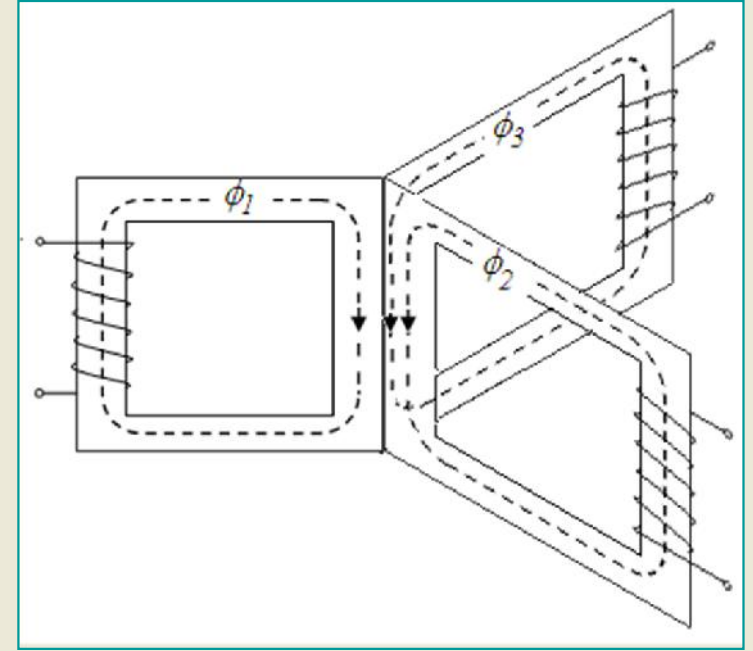
Mantel tipi nüve üzerine sarılmış üç-fazlı bir transformatör

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörler

### 3-FAZLI TRANSFORMATOR

Üç-fazlı transformatörde ortak nüve kullanılması nereden öyle açıklanabilir. Üstteki ekilde gösterilen üç adet tek-fazlı çekirdek tipi transformatörü dikkate alınız. Basitle tirmek amacıyla sadece primer sargıları gösterilmiştir. Dengeli üç-fazlı sinüzoidal bir gerilim sargılara uygulanırsa, üretilecek faz akıları da sinüzoidal ve dengeli olacaktır. Bu akıları taşıyan üç nüve bacası ekildeki gibi birleştirilirse, birle en (ortak) bacaktaki net akı sıfır olacak ve bu gerekçeyle ortak bacak alttaki ekilde gösterildi i gibi kaldırılabilir.

$$W_1 + W_2 + W_3 = 0$$



## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Bağlantı

Üç-fazlı transformatörlerin primerleri ve sekonderleri yıldız (Y) veya üçgen ( $\Delta$ ) ekinde birbirlerinden bağımsız olarak bağlanabilirler. Üç-faz transformatör ünitesini (bankasını) dört ayrı ekinde bağlamak mümkündür.

1. Yıldız-Yıldız (Y-Y)
2. Yıldız-Üçgen (Y-U)
3. Üçgen-Yıldız (U-Y)
4. Üçgen-Üçgen (U-U)

Bu dört bağlantıdan herhangi birinin gerçekleştirildiği üç-faz transformatör ünitesini analiz etmek için ünite içindeki tek bir transformatörün incelenmesi yeterlidir. Bankadaki herhangi bir transformatör daha önce çalışılan bir-fazlı transformatör davranışının tamamen aynısını gösterir. Üç-faz transformatörün empedans, gerilim regülasyonu, verim ve benzer diğer hesaplamaları, daha önce bir-faz transformatör için geliştirilen aynı teknikler ile bir-faz esasına göre yapılır.

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Ba lantılar

### Yıldız-Yıldız (Y-Y) ba lantı

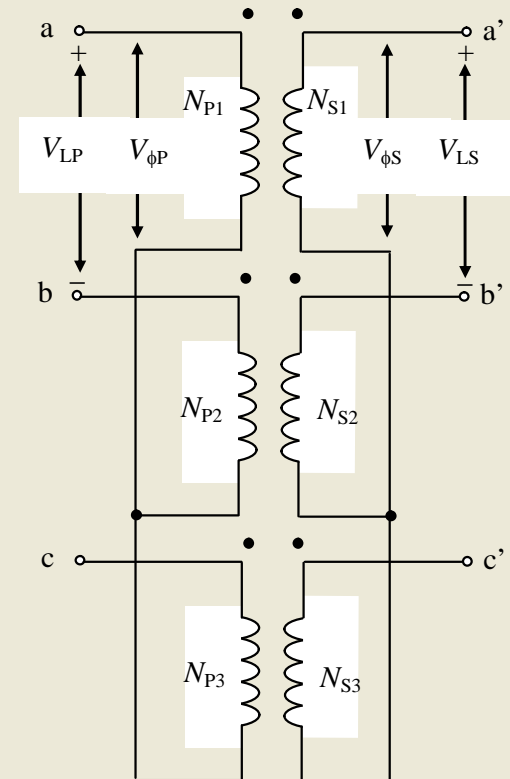
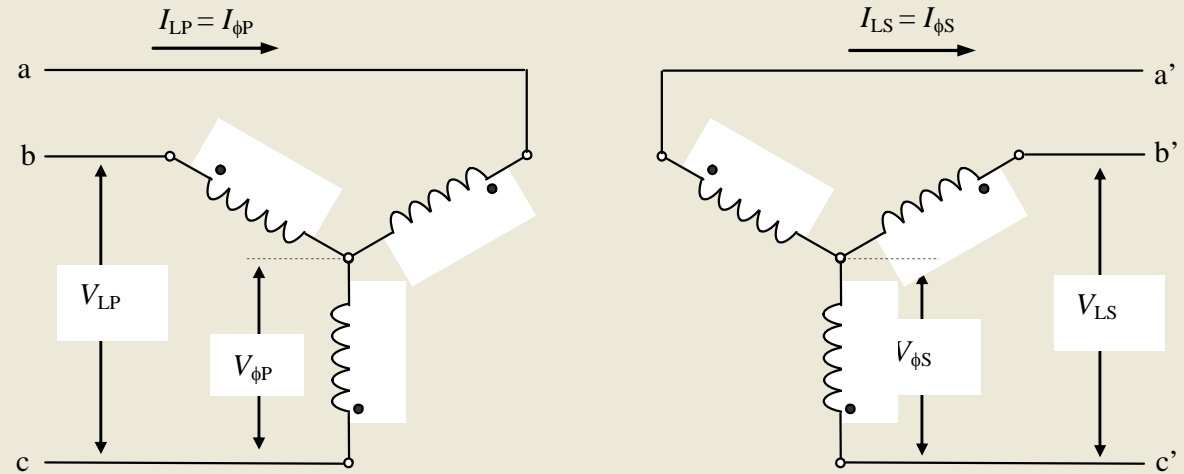
$$V_{WP} = V_{LP} / \sqrt{3}$$

$$V_{LS} = \sqrt{3} V_{WS}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} V_{WP}}{\sqrt{3} V_{WS}} = a$$

$$I_{LP} = I_{WP}$$

$$I_{LS} = I_{WS}$$



## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Bağlantılar

### Yıldız-Yıldız (Y-Y) bağlantı

Y-Y bağlantı çok önemli iki problemi meydana getirir:

1. Transformatör devresine bağlı yükler dengesiz ise, transformatör faz gerilimleri ciddi ölçüde dengesiz hale gelir.
2. Üçüncü (3.) harmonik gerilimleri üretmesidir.

Hem dengesizlik hem de 3. harmonik problemlerini gidermek için kullanılan iki teknik vardır:

- (i) Transformatör ile kaynağın nötr noktalarının birleştirilmesi
- (ii) Üçüncü (tersiyer) sargılı bir transformatörün kullanılması

***Pratikte Y-Y bağlantı çok nadir kullanılır.***

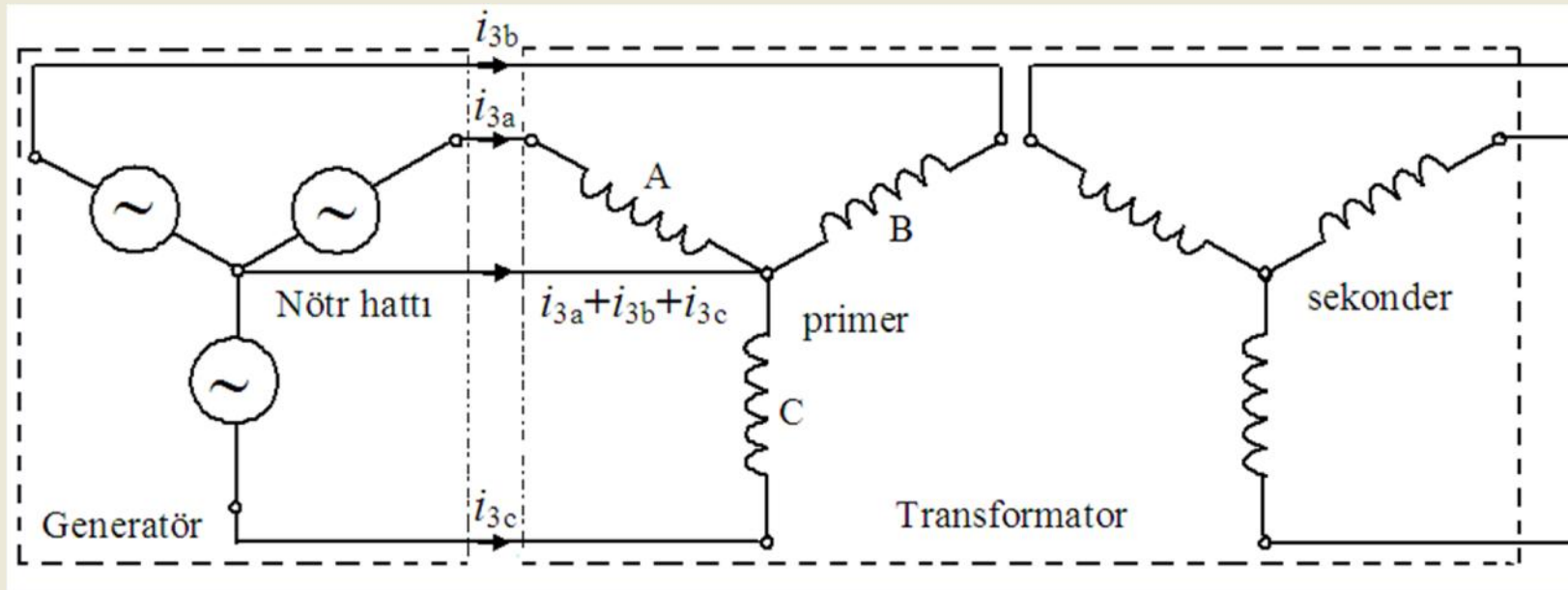
Çünkü bu bağlantının yaptığı i i di er bağlantılar da yapabilir.

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Ba lantılar

### Yıldız-Yıldız (Y-Y) ba lantı

(i) Transformatör ile kayna ın nötr noktalarının birle tirilmesi:

Özellikle primer tarafı nötr hattının topraklanması. Bu ba lantı 3.harmonik bile enlerinin yüksek harmonik gerilimleri olu turması yerine nötr hattına bir akım akı ına yol açar. Nötr hattı aynı zamanda yükün herhangi bir akım dengesizli ine kar ı akım dönü yolu sa lar.



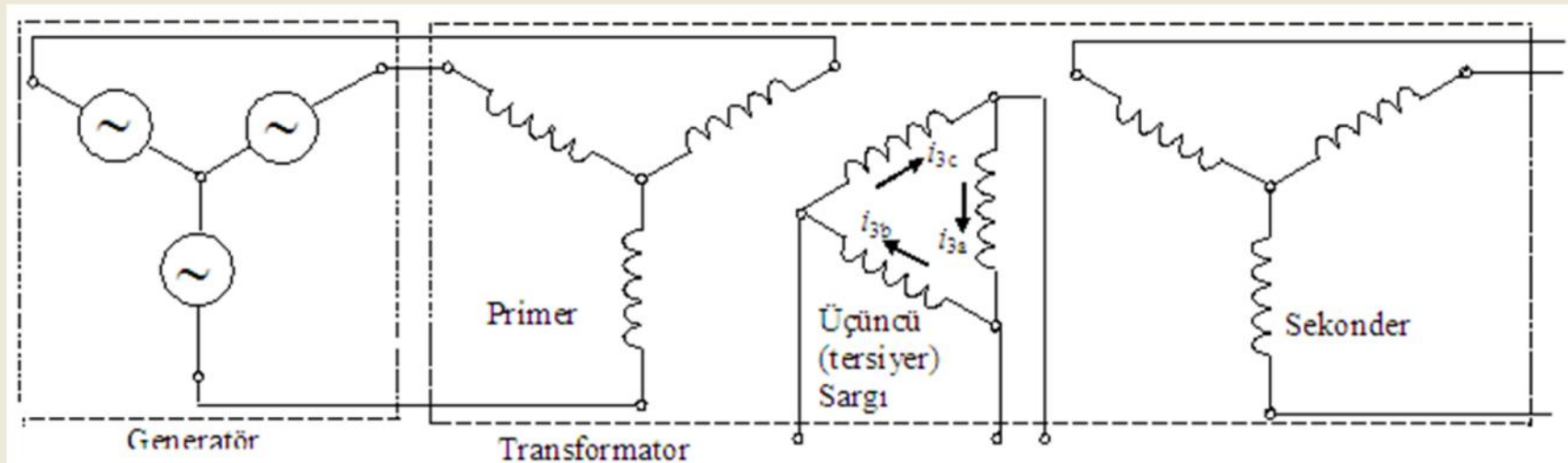
Generatör ile transformator nötr noktaları nötr hattı ile birle tirilmi tir

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Ba lantılar

### Yıldız-Yıldız (Y-Y) ba lantı

#### (ii) Üçüncü (tersiyer) sargılı bir transformatörün kullanılması

Transformatör ünitesinin üzerinde bulundu u aynı nüve üzerine üçüncü bir sargı (tersiyer) sarılır ve üçüncü sargı  $\Delta$ -ba lı olarak nüveye eklenirse, 3. harmonik gerilim bile enleri  $\Delta$ -ba lantıda toplanacak ve  $\Delta$ -ba lantılı sargılarda büyük bir akımın dola masına neden olacaktır.  $\Delta$ -ba lı üçüncü sargı sistemi, transformatörün nötr ucunu topraklamaya denk bir görevi yaparak, gerilimin 3. harmonik bile enlerini bastıracaktır.



## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Ba lantılar

### Yıldız-Üçgen (Y-U) ba lantı

$$V_{WP} = V_{LP} / \sqrt{3}$$

$$V_{LS} = V_{WS}$$

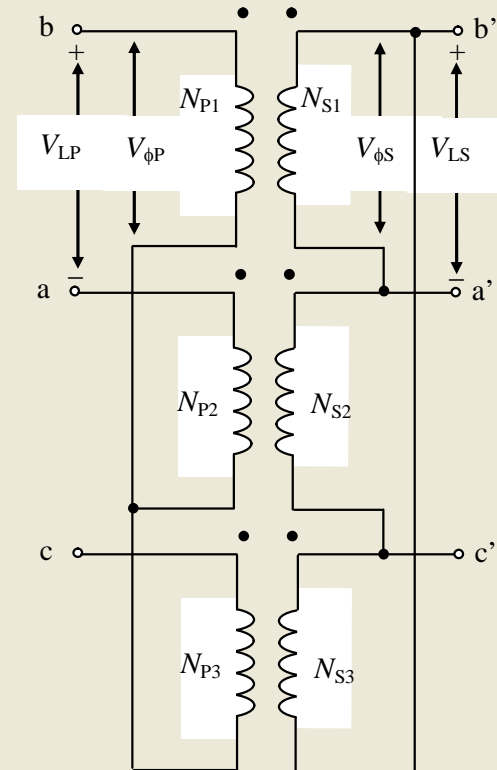
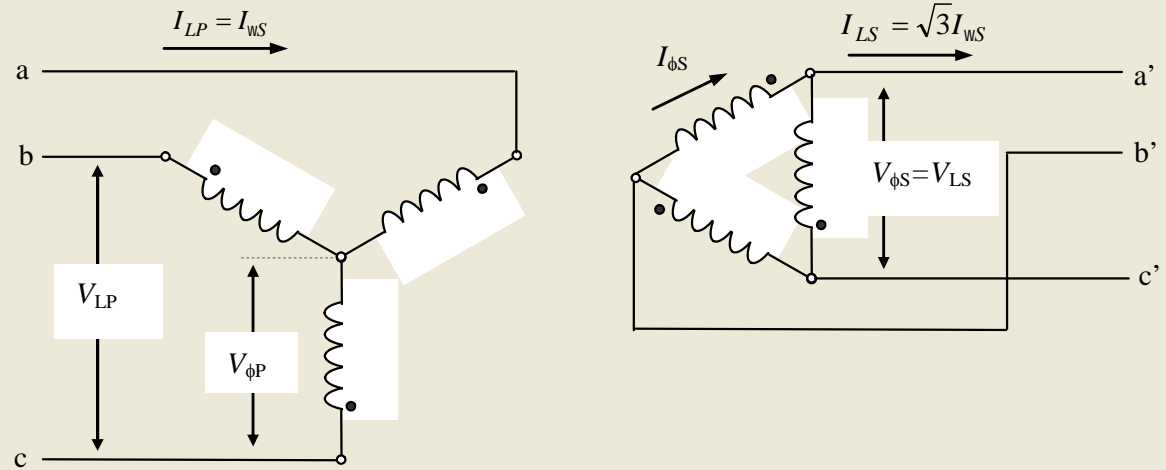
$$\frac{V_{WP}}{V_{WS}} = a$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} V_{WP}}{V_{WS}}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3} a$$

$$I_{LP} = I_{WP}$$

$$I_{LS} = \sqrt{3} I_{WS}$$





## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Bağlantılar

### Yıldız-Üçgen (Y-Ü) bağlantısı

*Y-Ü bağlantısının gerilimlerinde 3.harmonik problemi yoktur.*

*Çünkü 3.harmonikler  $\Delta$ -tarafıta sirkülasyon akımı içerisinde tüketilirler. Bu bağlantı dengesiz yüklerde daha kararlıdır. Çünkü Ü-bağlantısı olacak dengesizlik fazlara yeniden dağıtılır.*

*Bu bağlantısının bir problemi vardır. Ü-bağlantısından dolayı sekonder sargı gerilimi karışık olan primer sargı gerilimine göre  $30^\circ$  ileridir.*

*Bu faz kaymasının oluşması iki ayrı transformatör ünitesinin sekonderlerinin paralel bağlanmasına engel olur. Eğer paralel bağlantı yapılacaksa, transformatörlerin sekonderlerinin faz açıları da aynı olmak zorundadır.*

*Yüksek gerilimden orta veya düşük gerilime gerilim düşürücü olarak kullanılır. Yüksek gerilim tarafında nötr hattının topraklanması imkanı sağlar.*

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Ba lantılar

### Üçgen-Yıldız (U-Y) ba lantı

$$V_{WP} = V_{LP}$$

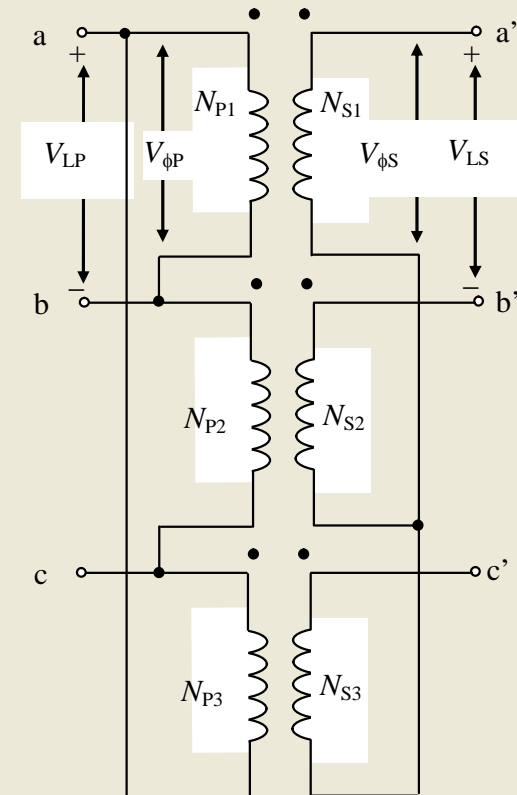
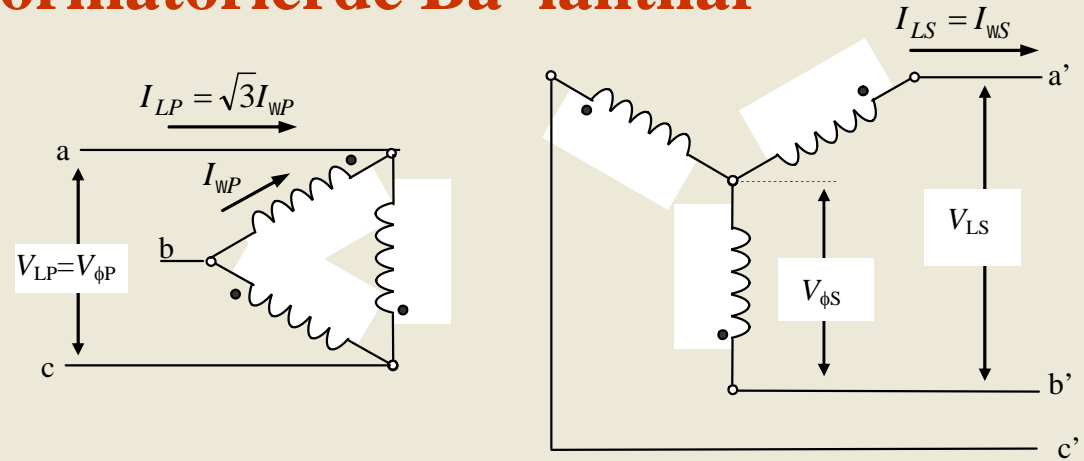
$$V_{LS} = \sqrt{3}V_{WS}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{WP}}{\sqrt{3}V_{WS}}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$I_{LP} = \sqrt{3}I_{WP}$$

$$I_{LS} = I_{WS}$$



## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Bağlantılar

### Üçgen-Yıldız (U-Y) bağlantısı

Bu bağlantının avantajları ve faz kayması Y- $\Delta$  bağlantısı ile aynıdır.

**Sekonder sargı gerilimi karılıklı olan primer sargı geriliminden  $30^\circ$  geridedir.**

Diğer bir deyişle, primer sargı gerilimi sekonder sargı geriliminden  $30^\circ$  ileridir.

Nötr hattı toprak hattına bağlanarak çoğu endüstrinin ihtiyacını karşılayan 3-fazlı 4-telli güç sistemi üretilir.

**Faz gerilimleri hat gerilimlerinden  $\sqrt{3}$  kat daha düşük olduğundan transformatör içinde yalıtım miktarı azaltılır.**

**Dezavantaj olarak Y-Y transformatör ile paralel bağlanamaz.** Çünkü Y-Y bağlantıda primer ve sekonder gerilimleri aynı fazlı iken  $\Delta$ -Y bağlantıda faz farkı vardır.

**U-Y bağlantısı gerilim yükseltmek için kullanılır.**

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Ba lantılar

### Üçgen-Üçgen (U -U) ba lantı

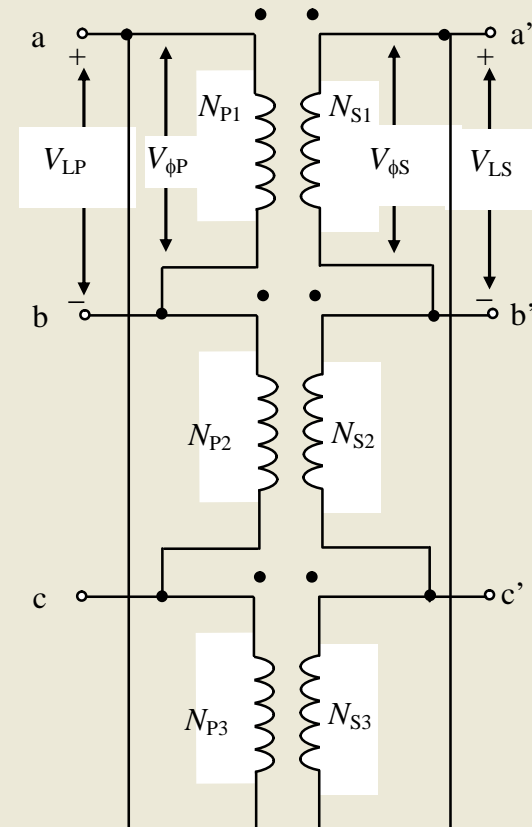
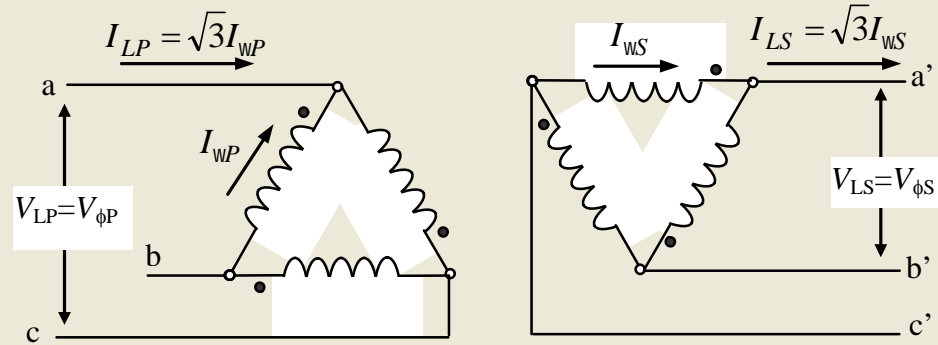
$$V_{LS} = V_{WS}$$

$$V_{WP} = V_{LP}$$

$$\frac{V_{WP}}{V_{WS}} = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} = a$$

$$I_{LP} = \sqrt{3}I_{WP}$$

$$I_{LS} = \sqrt{3}I_{WS}$$



## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Ba lantılar

### Üçgen-Üçgen (U -U) ba lantı

**Bu ba lantıda faz kayması yoktur.**

Ayrıca yük dengesizli i veya harmonikler ile ilgili bir problem de meydana gelmemektedir.

Transformatörün birisi arızalandı ında ya da bakıma alındı ında (yani yerinden söküldü ünde) di er iki transformatör görevlerini yapmaya devam ederler.

**Metal ergitme i lemleri için elektrik enerjisinin devamlılı ı çok önemlidir.**

Ancak transformator ünitesinin gücü azaltılmı olur. Bu duruma açık- $\Delta$  veya V-ba lantı denir.

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Harmonikler

Transformatör sargılarının bağlantıları yapılmadan önce bilinmesi gereken konulardan birisi de harmoniklerdir.

**Uyartım akımı harmonikleri:** Transformatörlerde manyetik nüvenin dorusal olmayan B-H e risinden dolayı uyartım akımı sinüsooidal değildir ve harmonikler içerir. Bir-faz için uyartım akımı harmonikleri:

$$i_w = i_{w1} + i_{w2} + i_{w3} + \dots$$

$$i_w = I_{m1} \cos \check{S}t + I_{m2} \cos 2\check{S}t + I_{m3} \cos 3\check{S}t + \dots$$

Burada,  $I_{m1}$ ,  $I_{m2}$  ve  $I_{m3}$  sırasıyla temel, ikinci ve üçüncü harmoniklerin tepe değerleridir.

Üç-faza ait 2. harmoniklerin vektöryel toplamı:

$$i_2 = I_{m2} \cos 2\check{S}t + I_{m2} \cos 2(\check{S}t + 120^\circ) + I_{m2} \cos 2(\check{S}t + 240^\circ) = 0$$

Üç-fazlı transformatörün sargılarının bağlantı ekline bakılmaksızın 2. harmoniklerinin veya çift sayılı harmoniklerinin vektöryel toplamı sıfır olmaktadır.

## 2.5. Üç Fazlı Transformatörlerde Harmonikler

Üç-fazlı ba lantıda hat akımlarının olu turan faz akımlarının içeri inde uyartım akımlarından kaynaklanan tek sayılı harmonikler vardır. Tek sayılı harmoniklerinin vektöryel toplamı 2. harmoniklerde oldu u gibi sıfır olmamaktadır.

$$i_3 = I_{m3} \cos 3\check{S}t + I_{m3} \cos 3(\check{S}t + 120^\circ) + I_{m3} \cos 3(\check{S}t + 240^\circ)$$

$$i_3 = 3I_{m3} \cos 3\check{S}t$$

Burada,  $I_{m3}$  3.harmonik akımlarının tepe de eridir.

Üçüncü harmonik akımları sekonderde sinüzoidal olmayan gerilimler endükler. Bu nedenle, üç-fazlı transformatörlerde ba lantı ekli belirlenirken harmoniklerin olumsuz etkileri dikkate alınmalıdır.

## KAYNAKLAR

1. Prof. Dr. Güngör BAL, “**Do ru Akım Makinaları ve Sürücüler**”, Seçkin Yayınevi, Ankara 2008
2. Prof. Dr. Güngör Bal, “**Transformatörler**”, Seçkin Yayıncılık, 2012
3. Stephen J. Chapman, “**Elektrik Makinalarının Temelleri**”, Ça layan Kitabevi, 2007, Çeviren: Prof. Dr. Erhan AKIN, Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN