# Fö 8 - TMEI01 Elkraftteknik
# Kraftelektronik

Christofer Sundström

19 februari 2020

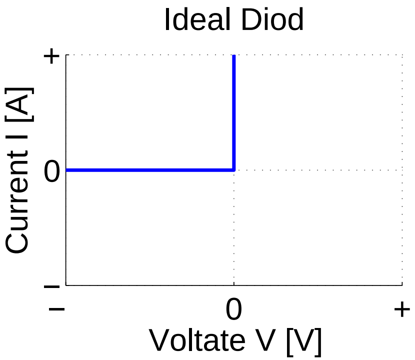
# Outline

# Kraftelektronik, översikt

- Används för att omvandla elektriska spänningar och strömmar
- Bred flora av komponenter, gemensamt är förmågan att switcha och agera strömventiler
  Exempel:
  - Diod, Zenerdiod
  - IGBT / FET - Transistorer
  - Diac, Triac, Tyristor
- Skillnaden mellan komponenterna är i princip möjligeten att styra dem, samt vilka strömmar och spänningar de tål.
- Olika tillämpningar
  - Likriktare - För att göra växelspänning till likspänning
  - Växelriktare - För att göra växelspänning av lik- eller växel-spänning

# Likriktning, grunder

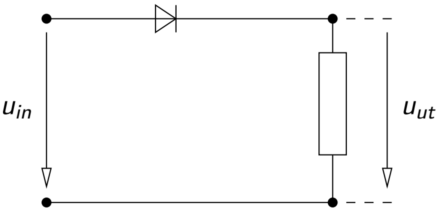
**Aktiv komponent:** Diod

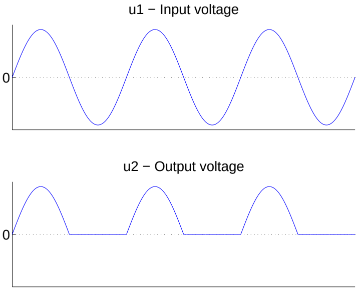



- Leder i framriktningen
- Spärrar i backriktningen

# Likriktning, grunder

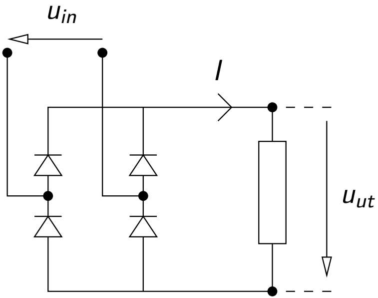
Enklaste fallet: **Enfas - Halvvågslikriktare** (Enpulskoppling)

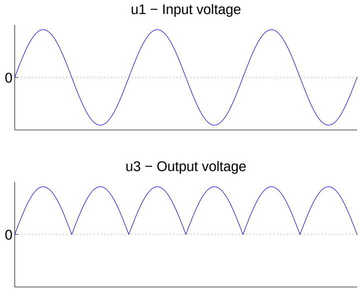


# Likriktning, grunder

Steg 2 - **Enfas** - **Fullvågslikriktare** (Tvåpulskoppling)



# Likriktat medelvärde - repetition spänningar

**Olika mått på spänningens storlek**

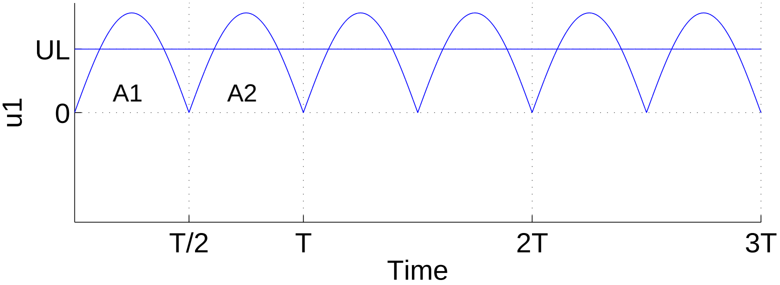
| Storhet | Värde |
| ---: | --- |
| Toppvärde | $\hat{u}$ |
| Medelvärde | $U_L$ |
| Effektivvärde | $U$ |

- Effektivvärdet är användbart vid effekt-räkningar där medeleffekten är intressant eftersom $p(t) = \frac{u^2(t)}{R}$.
- Medelvärdet är användbart för räkningar på t.ex. liksströmsmaskiner där medeleffekten är mindre intressant än medelspänningen.

# Likriktat medelvärde, exempel

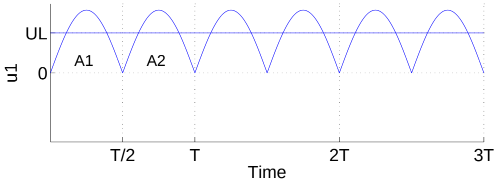
Beräkna likriktade medelvärdet $U_L$ av $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$ för

1. Halvvågslikriktare, A1 är arean under en periodtid.
2. Helvågslikriktare, A1 + A2 är arean under en periodtid.



# Likriktat medelvärde, exempel

Beräkna likriktade medelvärdet $U_L$ av $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$




**Helvåg**:

$$U_L = \frac{1}{T}\int_0^T u_1(t)dt = \Big/ A_1 = A_2 \Big/ = \frac{1}{T} \cdot \left\{ 2 \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} u(t)dt \right\} =$$

$$= \Big/ \omega = 2\pi f = \frac{2 \cdot \pi}{T} \Big/ = \frac{\omega}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \hat{u} \sin(\omega t)\, dt =$$

$$= \frac{\omega}{\pi} \cdot \hat{u} \left[ \frac{-\cos(\omega t)}{\omega} \right]_0^{\frac{\pi}{\omega}} = \frac{\hat{u}}{\pi} [-\cos(\pi) - -\cos(0)] =$$

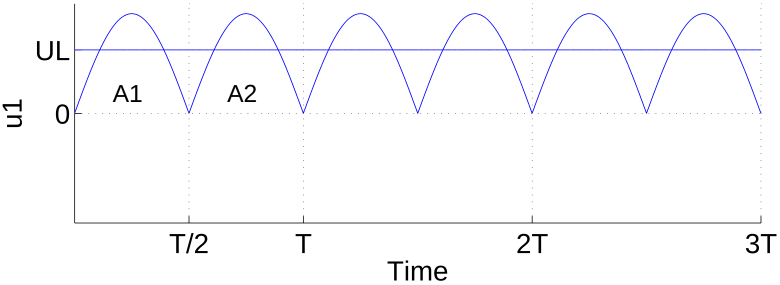
$$= \frac{\hat{u}}{\pi} [- -1 + 1] = \frac{2\hat{u}}{\pi}$$

**Halvvåg**: $A_2 = 0 \Rightarrow U_L = \frac{\hat{u}}{\pi}$

# Effektivvärde av sinus (RMS)

Beräkna **effektivvärdet** $U$ av $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$ för helvågslikriktare
(RMS = Root Mean Square = Effektivvärde)

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u(t)^2 dt}$$



# Matematisk utvikning, Eulers sinussamband

**Euler-formler**: sinus-samband från $e^{jx} = \cos x + j \cdot \sin x$
(Istället för att memorera en massa trigonometriska formler)

$$\begin{aligned}
e^{jx} &= \cos(x) + j \cdot \sin(x) \quad \text{Detta räcker för att härleda resten} \\
e^{-jx} &= \cos(-x) + j \cdot \sin(-x) = \cos(x) - j \cdot \sin(x) \\
&\Longrightarrow
\end{aligned}$$

$$\sin x = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j}$$

$$\cos x = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$$

$$\sin^2 x = \left(\frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j}\right)^2 = \frac{e^{2jx} + e^{-2jx} - 2e^0}{-4} = \frac{1 - \cos 2x}{2}$$

# Effektivvärde av sinus (RMS)

Beräkna **effektivvärdet** av $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{\hat{u}^2}{T}\left(\int_0^{T/2} \sin^2(\omega t)dt + \int_{T/2}^{T} \sin^2(\omega t)dt\right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{2\hat{u}^2}{T}\int_0^{T/2} \sin^2(\omega t)dt} = \Big/ \sin^2(\omega t) = \frac{1-\cos(2\omega t)}{2}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \Big/ =$$

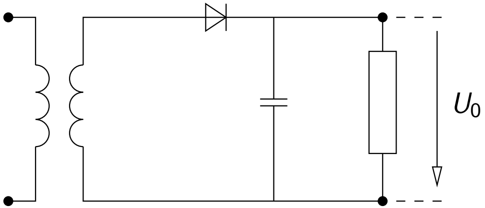
$$= \sqrt{\frac{2\hat{u}^2}{2\pi}\omega \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{2}\right) dt} = \hat{u}\sqrt{\frac{\omega}{\pi}\left(\int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{1}{2}dt - \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{\cos(2\omega t)}{2}dt\right)} =$$

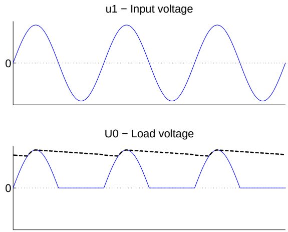
$$= \hat{u}\sqrt{\frac{\omega}{\pi}\left(\left[\frac{t}{2}\right]_0^{\frac{\pi}{\omega}} - \left[\frac{\sin(2\omega t)}{4\omega}\right]_0^{\frac{\pi}{\omega}}\right)} = \hat{u}\sqrt{\frac{\omega}{\pi}\left(\frac{\pi}{2\omega} - 0\right)} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$$

# Värden på olika spänningar i enfas likriktare

| **Storhet** | **Halvvåg** | **Hel-/Full-våg** |
|---|---|---|
| Toppvärde | $\hat{u}$ | $\hat{u}$ |
| Medelvärde | $U_L = \frac{\hat{u}}{\pi}$ | $U_L = \frac{2\hat{u}}{\pi}$ |
| Effektivvärde | $U = \frac{\hat{u}}{2}$ | $U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$ |

# Exempel på likriktare: Krets med kondensator + Spole

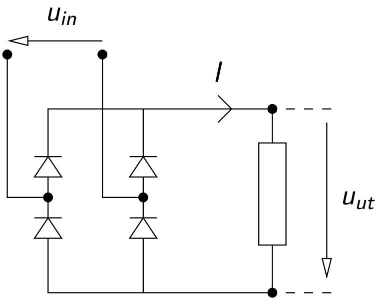


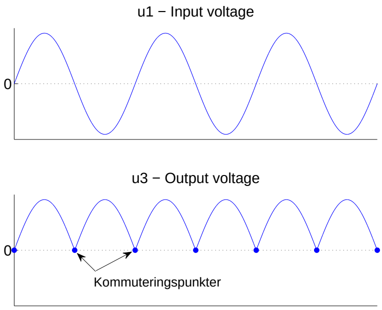




a) Glättning, kapacitansen laddas upp på *sinus-topparna* och driver sedan lasten.

# Kommuteringspunkter

Betrakta tvåpulskopplingen



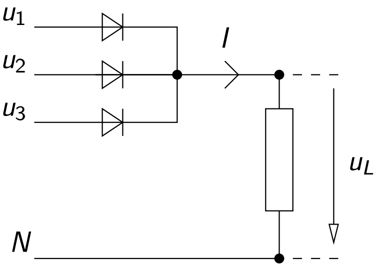

När spänningen passerar nollan så byts dioderna av så att de som förut spärrade leder o.s.v. Detta kallas **kommuteringspunkter**

**Kommuteringspunkter**

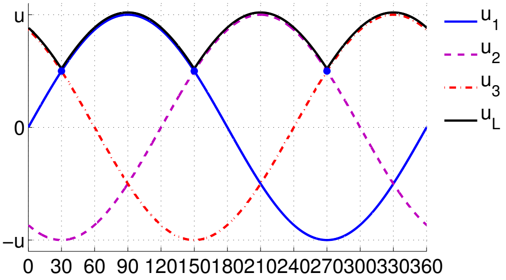
Kommuteringspunkterna behöver inte alltid inträffa vid noll-genomgång.

# Likriktning, Trepulskoppling

Trepulskoppling (3-fas till DC)




Den Diod som för tillfället känner högst spänning leder medan de andra spärrar. Kommuterings-punkterna blir 30°, 150°, 270° o.s.v.

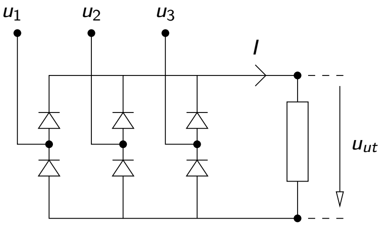


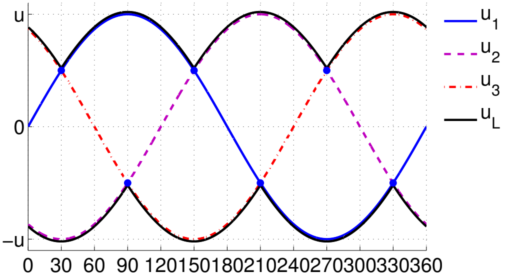

För trepulskopplingen fås likriktat medelvärde enligt nedan

| **Storhet** | **Värde** |
|---|---|
| Toppvärde | $\hat{u} = \hat{u}_F$ |
| Medelvärde | $U_L = \frac{3\sqrt{3}\cdot\hat{u}_F}{2\cdot\pi} = \frac{3\cdot\hat{u}_H}{2\cdot\pi}$ |

# Likriktning, Sexpulskoppling

Sexpulskoppling



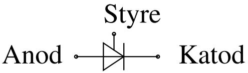

Dioderna leder parvis så att spänningen $u_{ut}$ blir maximala skillnaden mellan de tre fasspänningarna. Kommuteringspunkterna blir 30°, 90°, 150° o.s.v.

För sexpulskopplingen fås likriktat medelvärde enligt nedan

| **Storhet** | **Värde** |
|---|---|
| Toppvärde | $\hat{u} = \hat{u}_F$ |
| Medelvärde | $U_L = \frac{3\sqrt{3}\cdot\hat{u}_F}{\pi} = \frac{3\cdot\hat{u}_H}{\pi}$ |

# Styrning av likspänning, Tyristorn

**Tyristor** (styrbar diod) - Symbol



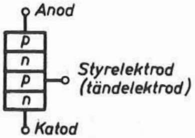

Tyristorn kan inta tre olika tillstånd

- Ledande, när ström flyter från anod till katod
- Spärrande, när en yttre spänning försöker driva ström baklänges, från katod till anod.
- Blockerande tillstånd, när en yttre spänning försöker driva ström från anod till katod, men ström i styret saknas.

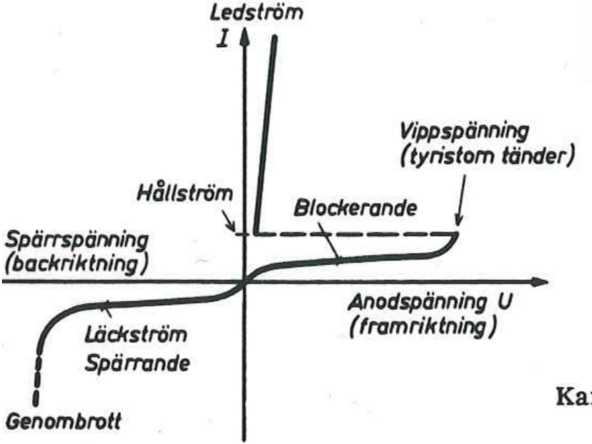
**Tyristor, funktion**

En tyristor tänds med hjälp av en strömpuls på styret. När tyristorn väl börjat leda så fortsätter den av sig själv så länge strömmen genom tyristorn är större än den s.k. hållströmmen.

# Styrning av likspänning, Tyristorn forts.



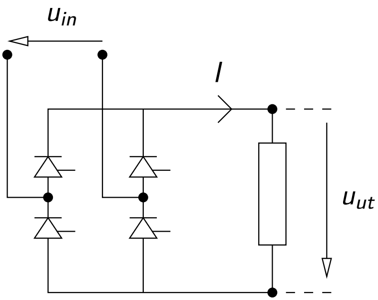

Schematisk uppbyggnad av tyristor med skikt av p- och n-typ

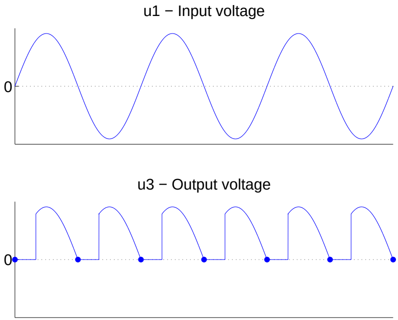



Karakteristik för tyristor

# Styrning av likspänning, Exempel

**Helstyrd tvåpulskoppling**



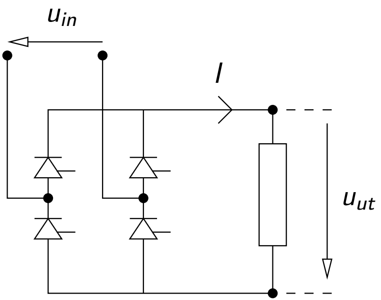



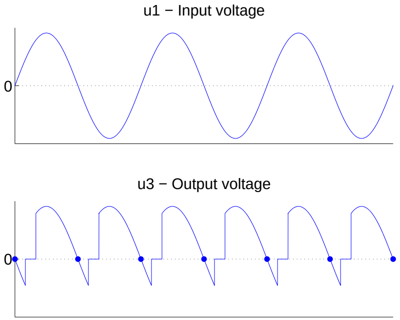

Tändvinkel $\alpha = 60^\circ$, resistiv last

Exempel på styrning: Tändvinkeln $\alpha$ för tyristorerna räknas från den **naturliga kommuteringspunkten**.

# Styrning av likspänning, Exempel

**Helstyrd tvåpulskoppling** - Induktiv last

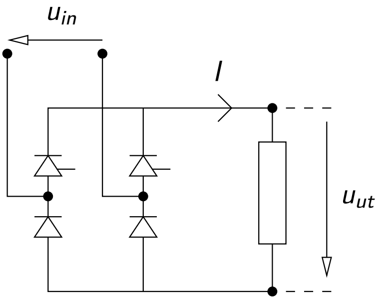


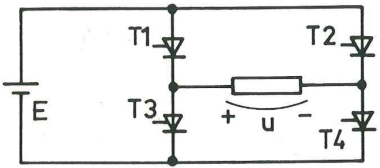

Tändvinkel $\alpha = 60°$, starkt induktiv last

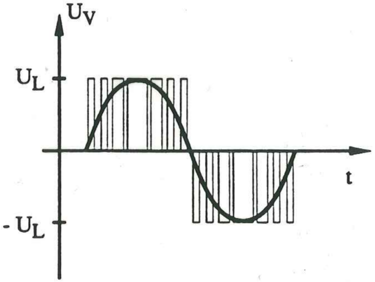
När matnings-spänningen över tyristorn växlar tecken fortsätter den induktiva lasten att dra ström och håller tyristorn öppen.

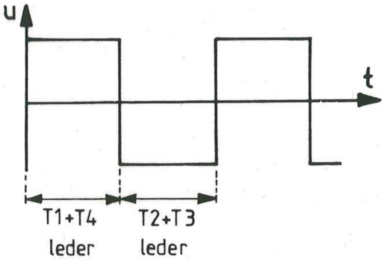
### Halvstyrd tvåpulskoppling




- Billigare än helstyrd
- Används i princip alltid om inte syftet är att agera växelriktare.



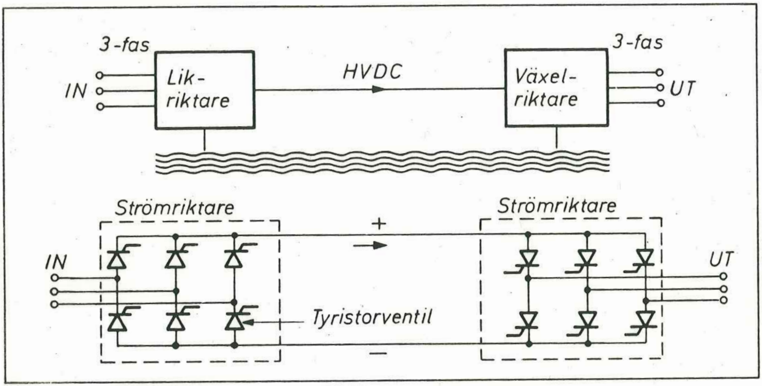




Exempel på grundkrets för växelriktning och tillhörande utseende på utspänning. Elmaskinernas induktanser filtrerar kurvan så att strömmen som uppstår i lindningarna närmar sig sinusform.

De förluster som uppstår i dioderna är beroende av diodernas switchtid i förhållande till switchfrekvensen.

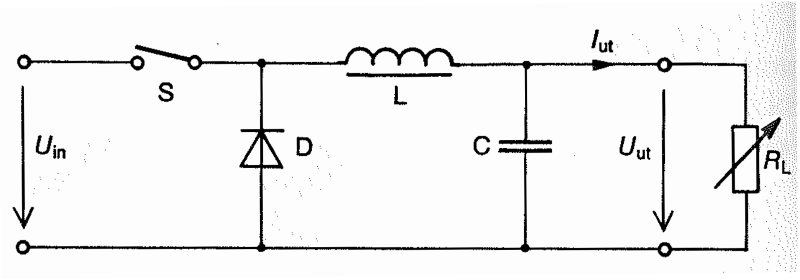
# Växelriktning, HVDC




Principen för kraftöverföring med HVDC

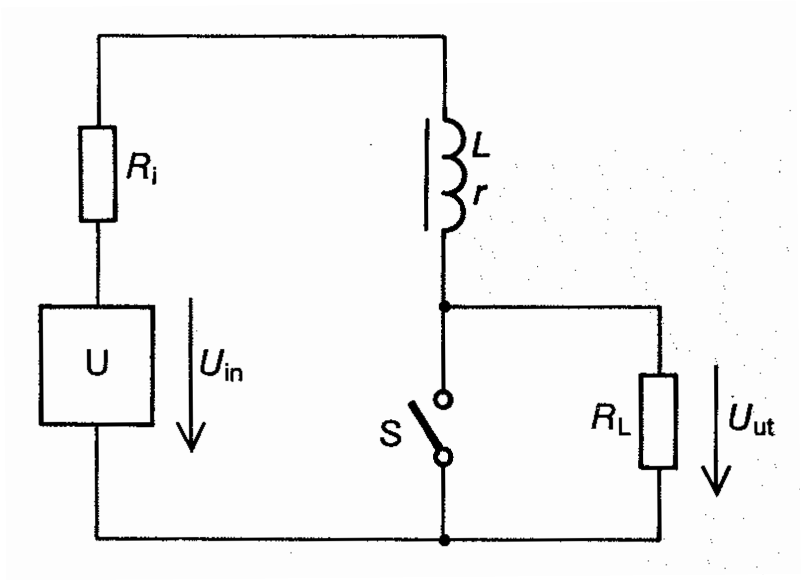
- HVDC = High Voltage Direct Current
- Svensk uppfinning, började användas till Gotland 1954.
- Nya kraftelektronikkomponenter (t.ex. Tyristorventilen från 1970) gör tekniken effektivare och effektivare genom att minska switchförlusterna samt möjliggöra högre spänningar.

# Likspänningsomriktare, Step Down




- När S är sluten blir $U_{ut} = I_{ut} R_L$
- När S är öppen är $U_{in}$ bortkopplad. $I_{ut}$ passerar då dioden $D$, spolen $L$, och lasten $R_L$. Strömmen avtar med tiden och går mot noll.
- $U_{ut}$ blir medelvärdet av spänningen över dioden.

# Likspänningsomriktare, Step Up



# Exempel: Styrd likriktare

En tyristorstyrd trepulslikriktare ansluts till ett trefasnät med huvudspänning $U_H = 400$ V.

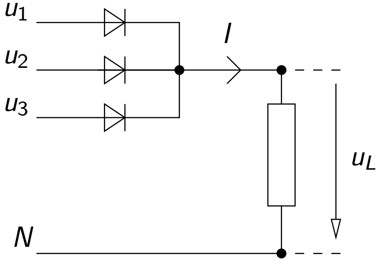
a) Rita ett kretsschema för kopplingen och sätt ut spänningar och strömmar.

b) Skissa spänningen över lasten för de två fallen med rent resistiv samt starkt induktiv last och tändvinkel $\alpha = 30^\circ$.

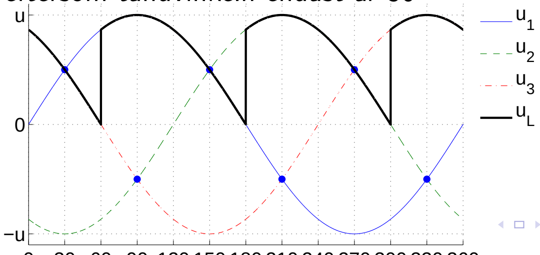
c) Vilken tändvinkel $\alpha$ skall tyristorerna ges för att den likriktade spänningens medelvärde skall bli 120 V? Antag att den anslutna lasten är rent resistiv.

# Exempel: Styrd likriktare, lösning

a)

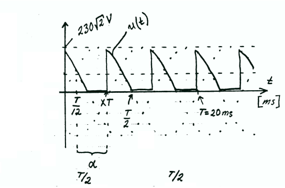



b) Figurerna för induktiv och resistiv last blir helt identiska eftersom tändvinkeln endast är 30°



# Exempel: Styrd likriktare, lösning

c)
Låt $x$ vara fördröjningen till tillslag mätt i periodandelar enligt figuren nedan.




Vi får då

$$U_L = 120\text{V}$$

$$U_L = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\cdot dt = \frac{3}{T}\int_{x\cdot T}^{T/2} u(t)\cdot dt = \frac{3}{T}\int_{x\cdot T}^{T/2} 230\cdot\sqrt{2}\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot dt =$$

$$= \Big/ T = \frac{2\pi}{\omega}\Big/ = \frac{3\cdot\omega}{2\pi}\cdot 230\sqrt{2}\left[\frac{-\cos(\omega\cdot t)}{\omega}\right]_{\frac{2\pi x}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} =$$

$$= 155,3\left[-\cos(\pi)+\cos(2\pi x)\right] \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow \cos(2\pi x) = \frac{120-155,3}{155,3} \Rightarrow x = 0.287$$

$T$ motsvarar $360^\circ$ så $xT$ motsvarar $103,20^\circ$ och

$\alpha = 103,20 - 30 = 73,2^\circ$