

1.6 - Transformatorn

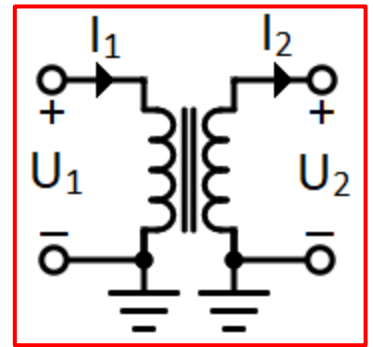
1.6.1 - Transformatorns funktion

- Transformatorn är en komponent som i sin grundform består av två spolar lindade på var sin sida av en järnkärna, vilket möjliggör att spänningsnivån i elnät samt elektronikutrustning kan omvandlas efter behov via induktionseffekten.
- Transformatorn är en elektronikkomponent som omvandlar växelspanningar från en viss spänningsnivå till en annan (från U_1 till U_2 i figuren till höger), exempelvis från 400 kV ned till 130 kV eller från 400 V upp till 10 kV.
- Omvandlingen av spänningsnivån sker via induktionseffekten. Som vi kommer se senare så förändras också strömnivån i omvänd proportion med förändringen av spänningsnivån.
- Transformatorn består alltså av två separata sidor, en primärsida (eller uppspänningssida) samt en sekundärsida (eller nedspänningssida), där primärsidan är den sida av transformatorn med högre spänningsnivå.
- Som exempel, om spänningen U_1 i figuren ovan är lika med 400 kV och spänningen U_2 är lika med 200 kV så kallas 400 kV-sidan för primärsida, medan 200 kV-sidan kallas sekundärsida. Ibland innehåller sekundärsidan två spolar, vilket vi kommer se senare.
- På varje sida av transformatorn finns en spole. Strömmen som skickas in i spolen på primärsidan ger upphov till ett magnetfält, som överförs av järnkärnan till spolen på sekundärsidan.
- Det måste vara växelström som skickas in i transformatorn, så att magnetfältet konstant förändras, annars sker ingen induktionseffekt. Eftersom magnetfältet konstant förändras och spolen på sekundärsidan nu befinner sig inuti magnetfältet, så induceras/skapas en ström på sekundärsidan.
- Att använda en transformator är ett enkelt och billigt sätt att anpassa spänningsnivån till olika ändamål utan att medföra några stora effektförluster vid omvandling. I de riktigt stora transformatorstationerna omvandlas spänningen från 400 kV på transformators primärsida ner till 140 kV på dess sekundärsida, vilket brukar skrivas 400/130 kV.
- På grund av ekonomiska skäl används hög spänning för långa överföringar och lägre spänning för eldistribution på mindre avstånd, exempelvis inom en tätort, då strömmen I i en ledning kan hållas låg ifall spänningen U hålls hög för en given effekt P .
- Förlusteffekterna P_L i en ledare kan beräknas med formeln

$$P_L = R * I^2,$$

där R är ledarens resistans och I är strömmen som flödar genom ledningen.

- Därmed ökar förlusteffekterna kvadratisk med ökad ström genom ledningen. Detta medför att om strömmen I hade ökat med en faktor 100 så hade förlusteffekterna ökat med en faktor $100^2 = 10\,000$! Därmed är det mycket viktigt att hålla nere strömmen i ledaren, vilket sker genom att spänningen istället hålls hög.
- Spänningen måste dock transformeras ned nära konsumenterna för att man skall få tillgång till lämplig spänning för konsumentapparater. För att mata vissa apparater, såsom datorer och TV-apparater, så måste spänningen transformeras ned ytterligare. Utan transformatorer skulle stora elnät i praktiken inte kunna existera.



Olastad enfastransformator. I en transformator så omvandlas spänningen U_1 till spänningen U_2 , vilket också medför att strömmen I_1 omvandlar till strömmen I_2 , så att effekten P på de två sidorna av transformatorn är samma.

- När spänningen transformeras ned och strömmen ökar så kommer givetvis förlusteffekterna P_L öka, men dessa begränsas av att avståndet som strömmen färdas i ledaren kommer vara relativt kort. Vi såg tidigare att förlusteffekterna P_L i en ledare kan beräknas med formeln

$$P_L = R * I^2,$$

där R är ledarens resistans och I är strömmen som flödar genom ledningen. Ledarens resistans R kan i sin tur beräknas med formeln

$$R = \frac{\rho * L}{A},$$

där ρ är ledarmaterialets resistivitet, alltså dess individuella resistans, L är ledarens längd och A är dess area. Material som leder väl har låg resistivitet, vilket begränsar ledarresistansen R , som i sin tur begränsar förlusteffekterna P_L till viss grad.

- Notera att ledarresistansen R begränsas av längden L på ledaren. När spänningen transformeras ned och strömmen ökad så görs detta så nära hushållen som är praktiskt möjligt och säkert, för att därmed medföra att avståndet L som den höga strömmen färdas på begränsas, vilket begränsar kabelresistansen R , vilket i sin tur begränsar förlusteffekterna P_L .
- En stor anledning till att växelspanning började användas överhuvudtaget istället för att endast använda likspänning beror på att transformatorer bara fungerar med växelspanningar.

Likvärdig effekt på båda sidorna av transformatorn:

- Värt att notera är att effekten på de två sidorna av transformatorn är samma, förutom eventuella effektförluster. Som vi tidigare har sett med effektlagen så är effekten P lika med produkten av spänningen U och strömmen I :

$$P = U * I,$$

där P är effekten, U är spänningen och I är strömmen.

- Effekten P_1 och P_2 på de två sidorna av transformatorn är samma, så vi kan kalla denna effekt P :

$$P = P_1 = P_2$$

- Eftersom transformatorn har två sidor med olika spänningsnivåer (U_1 och U_2 i figuren ovan) så har dessa sidor också olika strömnivåer (I_1 och I_2) i figuren ovan; produkten av spänningen U och strömmen I på respektive sida av transformatorn är därmed samma (produkten är i båda fall lika med effekten P).
- Därmed så kan effekten P på de två sidorna av en transformator uttryckas med formeln

$$P = U_1 * I_1 = U_2 * I_2,$$

där U_1 och I_1 är spänningen respektive strömmen på primärsidan och U_2 samt I_2 är spänningen och strömmen på sekundärsidan.

- I praktiken betyder detta att om spänningsnivån halveras i transformatorn, exempelvis från $U_1 = 400$ kV till $U_2 = 200$ kV, så fördubblas samtidigt strömmen, från exempelvis $I_1 = 1$ A till $I_2 = 2$ A, eftersom effekten P på de två sidorna är samma. Vi kan visa detta genom att beräkna effekten P på de två sidorna av en olastad transformator, se nästa sida.

- I föregående exempel så kan effekten P på primärsidan enkelt beräknas till 400 kW, eftersom

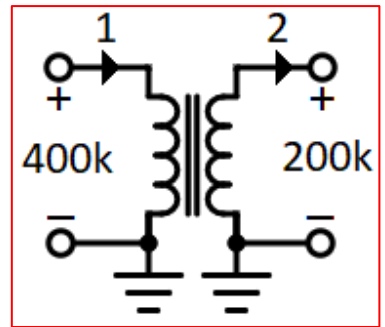
$$P = U_1 * I_1 = 400k * 1 = 400 \text{ kW}$$

- Som nämnts tidigare så är effekten på sekundärsidan lika stor som på primärsidan; alltså är alltså effekten P också lika med 400 kW på sekundärsidan. I föregående exempel så halveras spänningen från 400 kV till 200 kV.
- Eftersom effekten P är samma på de två sidorna av transformatorn så och spänningen halveras så fördubblas också strömmen; då strömmen I_1 på primärsidan är 1 A så blir därmed strömmen I_2 på sekundärsidan 2 A. Därmed blir effekten på sekundärsidan också 400 kW:

$$P = U_2 * I_2 = 200k * 2 = 400 \text{ kW}$$

- I föregående exempel så kunde vi mycket enkelt beräkna strömmen I_2 på sekundärsidan, men det är inte alltid så enkelt. Hur som helt så hade vi enkelt kunna beräkna I_2 , då vi kände till effekten P samt spänningen U_2 på sekundärsidan (400 kW respektive 200 kV), genom att transformera formeln ovan:

$$P = U_2 * I_2 \rightarrow I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{400k}{200k} = 2 \text{ A}$$



En halvering av spänningsnivån från primär- till sekundärsidan medför också en fördubbling av strömnivån.

Förhållandet mellan transformatorns omsättning och antalet lindningsvarv på de två sidorna av transformatorn:

- Transformatorn består, som nämnts tidigare, av två spolar runt en järnkärna, en spole på primärsidan och en spole på sekundärsidan. Dessa spolar kallas oftast lindningar. Den högre växelspänningen ansluts till primärlindningen och den lägre spänningen ansluts till sekundärlindningen.
- Lindningarna varvas runt en gemensam järnkärna, vilket gör dem magnetiskt kopplade. Lindningarna har olika antal varv koppartråd, N_1 och N_2 . Ration N_1 / N_2 mellan antalet lindningsvarv på de två sidorna av transformatorn kallas transformatorns omsättning och förkortas N :

$$N = \frac{N_1}{N_2},$$

där N är transformatorns omsättning och N_1 samt N_2 är antalet lindningsvarv på transformatorns primär- respektive sekundärsida.

- Som exempel, en omsättning N på fem betyder att antalet lindningsvarv N_1 på primärsidan är fem gånger högre än antalet lindningsvarv N_2 på sekundärsidan, eftersom

$$N = \frac{N_1}{N_2} = 5 \rightarrow N_1 = N * N_2 = 5 * N_2$$

- Transformatorns omsättning N har stor betydelse för spännings- och strömnivåerna på respektive sida av transformatorn, vilket vi kommer se nedan.

Förhållandet mellan transformatorns omsättning och spänningsnivåerna på de två sidorna av transformatorn:

- Sambandet mellan antalet lindningsvarv och spänningarna på en transformators primär- och sekundärsida är

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

där N_1 och N_2 är antalet varv koppartråd på primär- respektive sekundärlindningen, medan U_1 och U_2 är spänningen på primär- respektive sekundärsidan. Detta medför att fler lindningsvarv korrelerar med högre spänningsnivå på en given sida av en transformator.

- Eftersom antalet lindningsvarv på en viss sida av transformatorn är proportionerligt med spänningsnivån på denna sida så kan en transformators omsättning N beräknas via ration U_1 / U_2 mellan spänningen på primär- och sekundärsidan:

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \rightarrow N = \frac{U_1}{U_2}$$

- Som exempel, om U_1 är lika med 400 kV och U_2 är lika med 200 kV så är transformatorns omsättning N lika med två, eftersom

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{400k}{200k} = 2$$

- Eftersom omsättningen N är lika med två så måste primärsidan ha dubbelt så många lindningsvarv som sekundärsidan, eftersom

$$N = \frac{N_1}{N_2} = 2 \rightarrow N_1 = N * N_2 = 2 * N_2$$

- Som exempel, om sekundärsidan har $N_2 = 1000$ lindningsvarv så måste primärsidan ha $N_1 = 2000$ lindningsvarv, eftersom

$$N_1 = 2 * N_2 = 2 * 1000 = 2000$$

- Om antalet lindningsvarv N_1 på primärsidan är känt, men antalet lindningsvarv N_2 är okänt, så hade istället kunnat använda omsättningen för att beräkna hur många gånger färre lindningsvarv N_2 sekundärsidan skall ha i förhållande till primärsidan; en omsättning på två medför då att antalet lindningsvarv N_2 på sekundärsidan skall vara hälften av antalet lindningsvarv N_1 på primärsidan:

$$N = \frac{N_1}{N_2} = 2 \rightarrow N_2 = \frac{N_1}{N} = \frac{N_1}{2}$$

- Som exempel, om antalet lindningsvarv N_1 på primärsidan är 1600 så behövs alltså $N_2 = 800$ varv på sekundärsidan för att omsättningen, och därmed ration mellan spänningarna U_1 / U_2 på primär- respektive sekundärsidan, skall bli två, eftersom

$$N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{1600}{2} = 800$$

Förhållandet mellan transformatorns omsättning och strömnivåerna på de två sidorna av transformatorn:

- Sambandet mellan antalet lindningsvarv och strömmen som flödar genom en transformators primär- och sekundärsida är

$$N_1 I_1 = N_2 I_2,$$

där N_1 och N_2 är antalet lindningsvarv på primär- respektive sekundärsidan, medan I_1 och I_2 är de strömmar som flödar på primär- respektive sekundärsidan.

- Formeln ovan kan vidare omvandlas till

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

- Notera att antalet lindningsvarv på en given lindning är omvänt proportionellt med strömmen som flödar genom den.
- Eftersom transformatorns omsättning N är lika med ration mellan antalet lindningsvarv N_1 / N_2 på primär- och sekundärsidan, så indikerar omsättningen N ration I_2 / I_1 mellan strömmarna på sekundär- och primärsidan, eftersom

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

Förhållandet mellan spännings- och strömnivåerna på de två sidorna av transformatorn:

- Vi vet att förhållandet mellan omsättningen N och spänningarna U_1 och U_2 på primär- respektive sekundärsidan är lika med

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

samt att förhållandet mellan omsättningen N och strömmarna I_1 och I_2 på primär- respektive sekundärsidan är lika med

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

- Genom att sätta samman formlerna ovan via omsättningen N så kan följande formel härledas:

$$N = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1},$$

vilket medför att

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

- Därmed så är storleken på spänningen och strömmen på en viss sida av transformatorn, exempelvis spänningen U_1 och strömmen I_1 på primärsidan, omvänt proportionerliga.
- Detta är också logiskt, då effekten P på de två sidorna av transformatorn alltid är lika stora (förutom eventuella förlusteffekter); som exempel, om spänningen U_1 på primärsidan hade ökat med en faktor två så hade alltså strömmen I_1 minskat lika mycket (med en faktor två), eftersom effekten P på primärsidan hela tiden hålls konstant.

1.6.2 - Exempel på lastad enfastransformator

- Transformatorn till höger har omsättningen $N = U_1 / U_2 = 400 \text{ kV} / 100 \text{ kV} = 4$. Transformatorn är lastad på sekundärsidan med en last vars resistans R_2 är lika med $5 \text{ k}\Omega$.
- Vi kan enkelt beräkna strömmen I_2 på sekundärsidan till 20 A med Ohms lag; strömmen I_2 på sekundärsidan är lika med spänningen U_2 på sekundärsidan dividerat med lastens resistans R_2 :

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{100k}{5k} = 20 \text{ A}$$

- Därefter noterar vi att effekten P på sekundärsidan (samt primärsidan) är lika med 2 MW , eftersom

$$P = U_2 * I_2 = 100k * 20 = 2 \text{ MW}$$

- Därmed så kan vi beräkna strömmen I_1 på primärsidan via effektlagen, då effekten P på primärsidan är samma som sekundärsidan (2 MW); strömmen I_1 är lika med effekten P på primärsidan dividerat på spänningen U_1 på primärsidan:

$$P = U_1 * I_1 \rightarrow I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{2M}{400k} = 5 \text{ A}$$

- Vi hade också kunnat beräkna strömmen I_1 på primärsidan via omsättningen N ; omsättningen är lika fyra, eftersom spänningen U_1 är fyra gånger högre än spänningen U_2 :

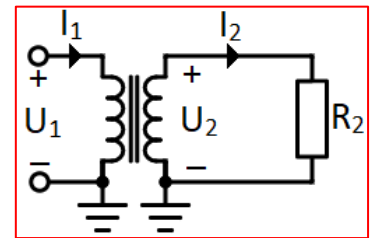
$$N = \frac{U_1}{U_2} = \frac{400k}{100k} = 4$$

- Att omsättningen N är lika med fyra medför också att strömmen I_1 är fyra gånger lägre än strömmen I_2 , eftersom

$$N = \frac{I_2}{I_1} = 4 \rightarrow I_1 = \frac{I_2}{N} = \frac{I_2}{4}$$

- Eftersom strömmen I_2 på sekundärsidan är lika med 20 A så blir strömmen I_1 därmed lika med 5 A , eftersom

$$I_1 = \frac{I_2}{N} = \frac{I_2}{4} = \frac{20}{4} = 5 \text{ A}$$



Lastad enfastransformator.

1.6.3 - Varför behövs transformatorer och högspänningsnät överhuvudtaget?

- Det finns en stor fördel med att hålla spänningsnivån mycket hög i elnät; lägre förlusteffekt. Förlusteffekten P_L ökar kvadratisk med ökad ström I :

$$P_L \propto I^2,$$

vilket betyder att förlusteffekten P_L är proportionerlig med strömmen I i kvadrat.

- Ration mellan förlusteffekterna på respektive sida av transformatorn kan därmed beräknas med formeln

$$\frac{P_{L1}}{P_{L2}} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2,$$

där P_{L1} och P_{L2} är förlusteffekterna på respektive sida av transformatorn (L står för *losses*, alltså förluster) och I_1 samt I_2 är strömmen som flödar genom lindningen på respektive sida av transformatorn.

- I föregående exempel av en enfastransformator, där transformatorns omsättning N var lika med fyra, så var strömmen I_1 på primärsidan fyra gånger lägre än strömmen I_2 på sekundärsidan, eftersom

$$N = \frac{I_2}{I_1} = 4 \rightarrow I_1 = \frac{I_2}{N} = \frac{I_2}{4}$$

- Eftersom förlusteffekten P_L är proportionerlig med strömnivån I i kvadrat och strömmen I_1 är fyra gånger lägre än strömmen I_2 så blir förlusteffekten P_L 16 gånger lägre på primärsidan än sekundärsidan, eftersom

$$\frac{P_{L1}}{P_{L2}} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 = \left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{1}{16}$$

- Effektförlusterna med en spänningsnivå på 400 kV är alltså 16 gånger lägre än om en spänningsnivå på 100 kV används. Därmed så använder man väldigt hög spänning i högspänningsnät (vanligtvis 400 kV), för att man skall kunna hålla strömmen väldigt låg och därigenom begränsa effektförluster. Dock är effekten P på de två sidorna av transformatorn alltid samma (förutom eventuella små förlusteffekter vid transformationen).
- Om ration mellan spänningsnivåerna är högre, exempelvis 400 kV / 40 kV, vilket ger en omsättning på tio, eftersom

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{400k}{40k} = 10,$$

så kommer strömmen I_1 på primärsidan vara tio gånger lägre än strömmen I_2 på sekundärsidan, eftersom

$$N = \frac{I_2}{I_1} = 10 \rightarrow I_1 = \frac{I_2}{N} = \frac{I_2}{10}$$

- Därmed så kommer förlusteffekten P_{L1} på primärsidan 100 gånger lägre än förlusteffekten P_{L2} på sekundärsidan, eftersom

$$\frac{P_{L1}}{P_{L2}} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 = \left(\frac{1}{10}\right)^2 = \frac{1}{100}$$

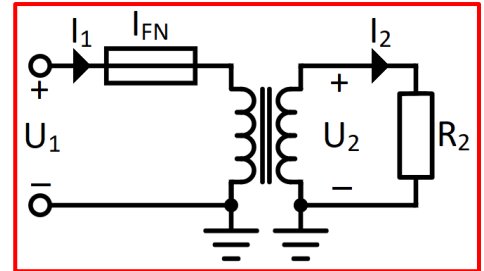
- Genom att hålla spänningsnivån högre i ett elnät så kan strömnivån alltså hållas lägre, vilket leder till mycket lägre förlusteffekt. När vi närmar oss våra elnät som vi använder, så är det dock inte praktiskt med så höga spänningsnivåer; din dator kanske klarar av högst 10–12 V! Därmed så måste vi transformera ned spänningen, trots ökade effektförluster. Dock så genomförs denna nedtransformering så lokalt möjligt, vilket medför att förlusteffekterna inte blir lika höga, eftersom de avstånd som strömmar behöver flöda genom kablar och dylikt är relativt korta; genom att begränsa sträckan som den högre strömmen måste flöda så begränsas förlusteffekter till viss grad.

1.6.4 - Konstruktion av en lastad enfastransformator med säkring

- En komponent skall drivas från ett eluttag via en enfastransformator, se figuren till höger. Komponenten placeras på sekundärsidan (se R_L) och har följande specifikationer:

Märkeffekt: $P_L = 2,5 \text{ W}$; Märkspänning: $U_N = 50 \text{ V}$

- Spänningen U_1 på primärsidan kommer från ett vanligt eluttag, vilket medför att dess effektivvärde är 230 V .



Enfastransformator, som har en säkring på primärsidan samt en last på sekundärsidan.

- En helt vanlig så kallad "trög" säkring placeras också på primärsidan, för att bryta strömmen vid eventuella överströmmar, som annars kan leda till brand. Att säkringen är "trög" betyder att den tål temporära överströmmar, exempelvis vid start av transformatorn; annars hade säkringen kunnat bryta varje gång transistorn startar.
- Vi skall konstruera enfastransformatoren till höger, genom att välja lämplig märkeffekt P_N på transformatorn, välja hur många lindningsvarv som behövs på de två sidorna av transformatorn för att strömmen I_2 , som flödar genom komponenten, skall kunna uppnå 500 mA samt välja en lämplig säkring för att strömmen på primärsidan (och därmed också sekundärsidan) inte kan bli för hög.

Val av transformatorns märkeffekt:

- Vi måste först välja lämplig märkeffekt P_N på transformatorn för att strömmen I_2 på sekundärsidan skall kunna uppgå till 500 mA med den specifika lasten. Eftersom komponenten är märkt 50 V så sätter vi spänningen U_2 på sekundärsidan till 50 V .

$$U_2 = 50 \text{ V}$$

- Eftersom spänningen U_2 är 50 V och strömmen I_2 på sekundärsidan är lika med 500 mA , så kan lastens resistans R_2 enkelt beräknas till 100Ω med Ohms lag; lastens resistans R_L är lika med spänningsfallet U_2 över lasten (50 V) dividerat med strömmen I_2 genom lasten (500 mA):

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{50}{500\text{mA}} = 0,1 \text{ k}\Omega = 100 \Omega$$

- Då blir transformatorns omsättning lika med $4,6$, eftersom

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{50} = 4,6$$

- För att beräkna transformatorns märkeffekt P_N så behöver vi ta reda på effekten P på en av sidorna av transistorn; eftersom komponentens märkeffekt P_L på nedspänningssidan är lika med $2,5 \text{ W}$ och transformatorn förser lasten med denna effekt så bör transformatorns märkeffekt P_N vara större eller P_L : Förslagsvis så sätts märkeffekten P_N något högre än P_L , alltså något högre än $2,5 \text{ W}$:

$$P_N \geq P_L = 2,5 \text{ W}$$

- För säkerhets skull så sätter vi därmed transformatorns märkeffekt P_N till 5 W .

$$P_N = 5 \text{ W}$$

Val av antalet lindningsvarv på de två sidorna av transformatorn:

- Därefter kan vi välja antalet lindningsvarv på de två sidorna av transformatorn. Vanligtvis så är detta redan gjort, exempelvis på färdigtillverkade transformatorer, men om man av någon anledning skulle behövt göra en egen transformator så kan det vara bra att veta hur man gör detta.
- Som vi såg tidigare så är transformatorns omsättning N lika med 4,6, vilket betyder att antalet lindningsvarv N_1 på primärsidan skall vara 4,6 gånger högre än sekundärsidan, eftersom

$$N = \frac{N_1}{N_2} = 4,6 \rightarrow N_1 = N * N_2 = 4,6 * N_2$$

- Låt oss säga att vi då sätter antalet lindningsvarv N_2 på sekundärsidan till 1000 varv, vilket är ett bra värde att utgå från på sekundärsidan. Därmed så bör antalet lindningsvarv N_1 på primärsidan sättas till 4600, eftersom

$$N_1 = 4,6 * N_2 = 4,6 * 1000 = 4600$$

Val av säkring:

- Därefter återstår att välja en "trög" säkring med lämplig märkström I_{FN} (F står för fuse, alltså säkring). Märkströmmen I_{FN} på säkringen bör väljas beroende på omständigheterna samt storleken på strömmen I_1 på primärsidan:

1. Ifall strömmen I_1 är mindre än ca 2 A (som i detta fall) så kan I_{FN} sättas ca 2,5 gånger högre än I_1 :

$$I_1 < 2 \text{ A} \rightarrow I_{FN} \approx 2,5 * I_1$$

2. Ifall strömmen I_1 ligger mellan ca 2–8 A så kan I_{FN} sättas ca 1,5 gånger högre än I_1 :

$$2 \text{ A} \leq I_1 \leq 8 \text{ A} \rightarrow I_{FN} \approx 1,5 * I_1$$

3. Ifall strömmen I_1 överstiger ca 8 A så kan I_{FN} sättas ca 1,2 gånger högre än I_1 :

$$I_1 > 8 \text{ A} \rightarrow I_{FN} \approx 1,2 * I_1$$

- Ifall det inte finns möjlighet att införskaffa en säkring med det beräknade värdet på märkströmmen I_{FN} så bör närmaste större standardvärde användas. Om säkringens märkström I_{FN} är något mindre än det beräknade värdet, exempelvis 10 mA, så kan detta väljas. Annars är det dock föredraget att välja ett värde uppåt.
- Det finns två anledningar till att vi använder reglerna ovan; för det första måste säkringen givetvis tåla strömmen I_1 på primärsidan. Säkringen måste också tåla tillfälliga strömspikar som kan uppkomma vid hög last eller vid uppladdning av andra komponenter, såsom kondensatorer i likriktare, där transformatorn försör kondensatorerna med ström.
- Ju högre ström I_1 på primärsidan, desto lägre sätter vi säkringens märkström I_{FN} i förhållande till I_1 , vilket beror på att säkringen annars inte kommer bryta för något annat än extremt höga överströmmar, som förmodligen kommer orsaka brand. Som exempel, för en ström I_1 på 1 A på primärsidan så kan säkringens märkström I_{FN} utan problem sättas 2,5 gånger högre än I_1 , alltså till 2,5 A, eftersom överströmmar på ca 2,5 A inte utgör någon större risk för brand eller dylikt, då strömmen inte är speciellt hög.
- Men för en ström I_1 på 10 A på primärsidan så är det ingen god idé att sätta säkringens märkström I_{FN} 2,5 gånger större än I_1 , då detta hade medfört att säkringen inte bryter förrän överströmmen uppgår till ett värde på minst 25 A! 25 A är väldigt hög ström och kan medföra risk för brand samt andra faror. I detta fall är det bättre att sätta säkringens märkström I_{FN} ca 1,2 gånger högre än I_1 , alltså till omkring $10 * 1,2 = 12 \text{ A}$. Därmed så tillåter vi små överströmmar för att inte säkringen skall bryta vid drift, samtidigt som små överströmmar tillåts.

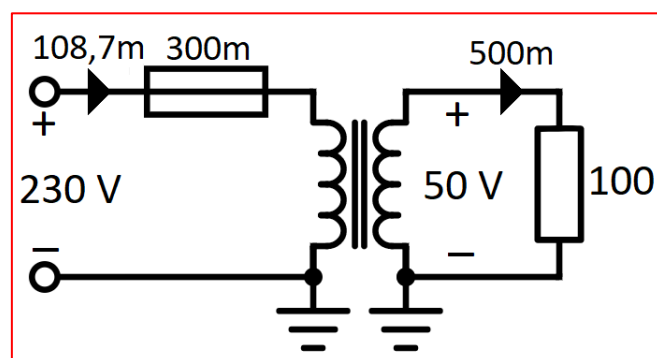
- I detta fall, då strömmen I_1 på primärsidan endast är ca 100 mA, så är det alltså en god idé att I_{FN} sätts till omkring 2,5 högre än strömmen I_1 på primärsidan, alltså till ca 300 mA:

$$I_{FN} \approx 2,5 * I_1 \approx 2,5 * 108,7m \approx 272 mA$$

- Närmaste större standardvärde är 300 mA, som därför används.

$$I_{FN} = 300 mA$$

- Säkringen skall också vara den vanligaste varianten, som kallas "trög", då denna tål en viss grad av temporära överströmmar, exempelvis vid start av transformatorn.
- Det finns också "snabba" säkringar, men användning av sådana riskerar att säkringen bryter vid start av transformatorn. Värt att nämna är också att det finns "våldigt tröga" säkringar som tål höga temporära överströmmar, men sådana används främst på väldigt tungstartade motorer eller mycket stora maskiner, som leder till mycket höga överströmmar vid start. Därför så använder vi en "trög" säkring.



Färdigdimensionerad enfastransformator. Säkringens märkström I_{FN} sattes till 300 mA, alltså något mer än 2,5 gånger strömmen I_1 på primärsidan.

1.6.5 - Transformator med dubbel sekundärlindning

- En del transformatorer har två lindningar på sekundärsidan, såsom figuren till höger. Sådana transformatorer sägs därför ha dubbel sekundärlindning och lämpar sig väl där både positiv samt negativ matningsspänning önskas, såsom till audioförstärkare. På sekundärsidan finns också en anslutning för jord, som används som jordpunkt för komponenten som skall drivas.
- Syftet med transformatorer med dubbla sekundärlindningarna är att den komponent som skall drivas skall ha tillgång till en viss positiv matningsspänning V_{CC} , negativ matningsspänning V_{EE} på samt en jordpunkt som referenspunkt.
- För exempelvis audioförstärkare så avgörs storleken på utsignalernas topp-till-topp-värde till stor del av hur hög positiv samt negativ matningsspänningen till förstärkaren är. Som exempel, om V_{CC} är 50 V och $V_{EE} = -50$ V så kan utsignalerna som högst anta värde 50 V och minst -50 V; i praktiken dock så kommer utsignalen som högst bli något lägre, på grund av interna komponenter inuti audioförstärkaren.
- Notera att absolutbeloppet på den positiva matningsspänningen V_{CC} samt den negativa matningsspänningen V_{EE} måste vara lika stora. Som exempel, om V_{CC} skulle vara 30 V och V_{EE} skulle vara -50 V så hade utsignalerna inte kunnat överstiga ± 30 V, samtidigt som OP-förstärkare vanligtvis konstrueras symmetriskt för exempelvis ± 50 V.
- För en sådan transformator gäller att den positiva matningsspänningen V_{CC} är lika stor som absolutbeloppet av den negativa matningsspänningen V_{EE} :

$$V_{CC} = |V_{EE}|$$

- Eftersom den negativa matningsspänningen V_{EE} är mindre än noll så är absolutbeloppet $|V_{EE}|$ lika med $-V_{EE}$

$$|V_{EE}| = -V_{EE},$$

eftersom

$$V_{EE} < 0$$

- Detta är mycket enkelt att visa i praktiken; antag att den negativa matningsspänningen V_{EE} är lika med -50 V. Absolutbeloppet $|V_{EE}|$ är då lika med 50 V, eftersom

$$|V_{EE}| = |-50| = 50 \text{ V}$$

- Samtidigt gäller att $-V_{EE}$ är lika med 50 V, eftersom

$$-V_{EE} = -(-50) = 50 \text{ V},$$

vilket medför att

$$|V_{EE}| = -V_{EE} = 50 \text{ V}$$

- Den totala sekundärspänningen U_{23} är lika med spänningsskillnaden mellan den positiva matningsspänningen V_{CC} samt den negativa matningsspänningen V_{EE} :

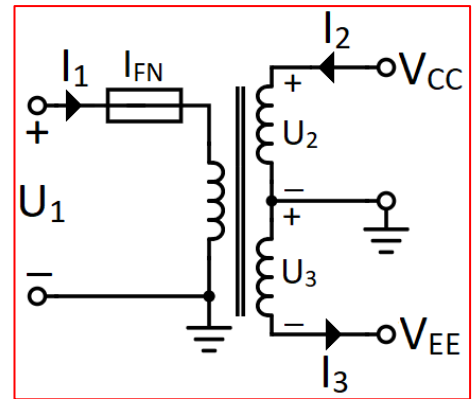
$$U_{23} = V_{CC} - V_{EE},$$

vilket kan omvandlas till

$$U_{23} = V_{CC} + |V_{EE}|,$$

eftersom

$$|V_{EE}| = -V_{EE}$$



Transformator med dubbel sekundärlindning. De två sekundärlindningarna har lika många lindningsvarv, vilket leder till att spänningen U_2 och U_3 är lika stora. Därmed så blir absolutbeloppet av matningsspänningarna V_{CC} samt V_{EE} lika stora. Dock kommer de ha olika polaritet; som exempel, om V_{CC} är lika med 50 V så blir V_{EE} lika med -50 V.

- Det är mycket enkelt att dimensionera en transformator med dubbel sekundärlindning; eftersom absolutbeloppet av den positiva samt negativa matningsspänningen på sekundärsidan är samma så skall de två lindningarna på sekundärsidan vara identiska sett till varvtal, spänningsfall samt ström. Därmed så gäller följande:

1. Spänningsfallen över de två sekundärlindningarna är samma, eftersom absolutbeloppet av de två matningsspänningarna V_{CC} och V_{EE} är samma:

$$U_2 = U_3,$$

då

$$V_{CC} = |V_{EE}|$$

2. Antalet lindningsvarv på de två sekundärlindningarna är därför samma:

$$N_2 = N_3,$$

eftersom förhållandet mellan spänningsfall samt antalet lindningsvarv i en transformator är följande:

$$\frac{U_2}{U_3} = \frac{N_2}{N_3}$$

- Eftersom sekundärspänningarna U_2 och U_3 är identiska så blir ration U_2 / U_3 lika med ett,

$$U_2 = U_3 \rightarrow \frac{U_2}{U_3} = 1,$$

vilket medför att ration N_2 / N_3 också är lika med ett:

$$\frac{N_2}{N_3} = 1,$$

vilket i sin tur betyder att sekundärlindningarna är identiska:

$$\frac{N_2}{N_3} = 1 \rightarrow N_2 = N_3$$

3. Strömmarna som flödar genom de två sekundärlindningarna är samma:

$$I_2 = I_3,$$

eftersom förhållandet mellan antalet lindningsvarv samt strömmarna som flödar genom dessa lindningar i en transformator är följande:

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{I_3}{I_2}$$

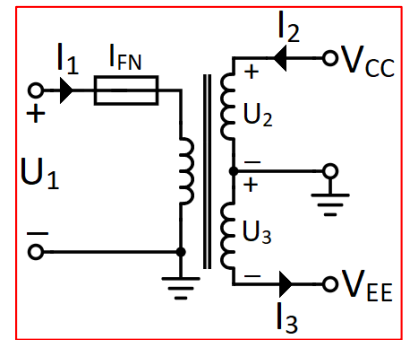
- Eftersom antalet lindningsvarv N_2 och N_3 är samma så blir ration N_2 / N_3 lika med ett:

$$N_2 = N_3 \rightarrow \frac{N_2}{N_3} = 1,$$

vilket medför att ration I_3 / I_2 också är lika med ett:

$$\frac{N_2}{N_3} = 1 \rightarrow \frac{I_3}{I_2} = 1 \rightarrow I_2 = I_3$$

- Notera i figuren till höger att strömmen alltid flödar från pluspolen till minuspolen; därför flödar strömmen I_2 denna gång från den positiva matningsspänningen V_{CC} ned till jord. Samtidigt så flödar strömmen I_3 från jord ned till den negativa matningsspänningen V_{EE} .



De två sekundärlindningarna skall vara identiska, vilket medför att de har samma antal lindningsvarv ($N_2 = N_3$), spänningsfall över dem ($U_2 = U_3$) samt ström som flödar genom dem ($I_2 = I_3$).

Regler för dimensionering av transformator med dubbel sekundärlindning:

- För att dimensionera en transformator med dubbel sekundärlindning så kan vi utgå från omsättningen N mellan primärlindningen N_1 samt en av sekundärlindningarna, exempelvis N_2 . Därmed så blir transformatorns omsättning N lika med ration av lindningarna N_1 och N_2 :

$$N = \frac{N_1}{N_2},$$

där lindningarna N_2 och N_3 skall vara identiska, då

$$N_2 = N_3$$

- Som vi har sett tidigare så gäller att induktansen L på en given spole är proportionell med antalet lindningsvarv N i kvadrat:

$$L \sim N^2,$$

- För en transformator innebär detta, förutsatt att lindningarnas dimensioner i övrigt är samma, att ration mellan induktansen L_1 samt L_2 på primär- respektive sekundärlindningen är lika med

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2},$$

vilket är ekvivalent med

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2,$$

där ration N_1 / N_2 är lika med transformatorns omsättning N .

- Därmed gäller att

$$\frac{L_1}{L_2} = N^2,$$

där L_1 samt L_2 på primär- respektive sekundärlindningens induktans och N är omsättningen.

- Eftersom sekundärlindningarna N_2 och N_3 är identiska:

$$N_2 = N_3,$$

så gäller att deras respektive induktans L_2 och L_3 skall vara samma, då

$$\frac{L_2}{L_3} = \left(\frac{N_2}{N_3}\right)^2 = 1,$$

vilket kan transformeras till

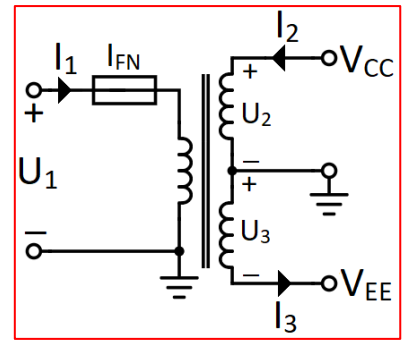
$$L_2 = L_3$$

- Som vi har sett tidigare så gäller också att transformatorns omsättning N kan beräknas via spänningsfallen U_1 och U_2 över spolarna:

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

eller via strömmarna I_1 och I_2 som flödar genom spolarna:

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



För att dimensionera en transformator med dubbel sekundärlindning så kan vi utgå från omsättningen mellan primärlindningen N_1 samt en av sekundärlindningarna, exempelvis N_2 . Eftersom de två sekundärlindningarna är identiska så dimensionerar vi sedan N_3 samma som N_2 .

- Om vi ansluter en last R_L mellan den positiva matningsspänningen V_{CC} och jord så kommer strömmen I_2 flöda igenom lasten, som kan beräknas ur spänningsfallet över lasten ($V_{CC} - 0$, vilket är samma som U_2) dividerat med lastens resistans, via Ohms lag:

$$I_2 = \frac{V_{CC} - 0}{R_L} = \frac{U_2}{R_L}$$

- Via transformatorns omsättning N kan vi därefter beräkna strömmar samt antalet lindningsvarv på de två sidorna av transformatorn.
- När transformatorns omsättning N har fastställts utifrån primär- och sekundärspänningen U_1 och U_2 , så kan lindningarnas induktans L_1 , L_2 och L_3 fastställas med formeln

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{L_1}{L_3} = N^2$$

där L_2 och L_3 skall vara lika stora:

$$L_2 = L_3$$

- Som exempel, för en primärspänning U_1 på 230 V samt en sekundärspänning U_2 på 100 V, så blir transformatorns omsättning N lika med 2,3, eftersom

$$N = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{100} = 2,3$$

- Ration mellan primär- och sekundärlindningens induktans L_1 / L_2 bör då hamna på en faktor 2,3 i kvadrat, vilket innebär en faktor 5,29, då

$$\frac{L_1}{L_2} = N^2 = 2,3^2 = 5,29$$

- Formeln ovan kan transformeras till

$$L_1 = 5,29 * L_2,$$

vilket indikerar att primärsidans induktans L_1 bör sättas 5,29 gånger högre än sekundärsidans induktans L_2 .

- Eftersom sekundärlindningarnas induktanser L_2 och L_3 skall vara lika stora, så gäller även att

$$L_1 = 5,29 * L_3$$

- Detta medför att om de två sekundärlindningarna L_2 och L_3 sätts till 1 μH var:

$$L_2 = L_3 = 1 \mu H,$$

så bör primärlindningens induktans L_1 sättas till omkring 5,29 μH , då

$$L_1 = 5,29 * L_2 = 5,29 * 1 \mu = 5,29 \mu H$$

- Närmaste standardvärde är 5,6 μH . För övrigt kan det vara fördelaktigt att välja ett något högre värde på primärlindningens induktans L_1 än beräknat, då vi kan räkna med att en viss mängd effektförluster kommer medför något minskade sekundärspänningar U_2 och U_3 .
- Genom att sätta primärlindningens induktans L_1 till ett lite högre värde, så kommer sekundärspänningar U_2 och U_3 höjas något, förutsatt att effektförlusterna är noll. I praktiken så lär då U_2 och U_3 hamnar mycket nära specificerat värde, vilket i detta fall är ± 100 V.
- Därmed sätter vi sätta primärlindningens induktans L_1 till 5,6 μH :

$$L_1 = 5,6 \mu H$$

- För att beräkna transformatorns märkeffekt P_N så kan vi mäta hur stor effekt som dras från en av transformatorns sidor vid drift.
- För enkelhets skull så kan vi beräkna effektförbrukningen P från primärsidan med effektlagen:

$$P_N \approx P = U_1 * I_1,$$

där P_N är transformatorns märkeffekt, P är effektförbrukningen på primärsidan, U_1 är spänningsfallet över primärlindningen och I_1 är strömmen som flödar genom denna.

- Märkeffekten P_N bör sedan sättas så nära det beräknade värdet på effektförbrukningen P som möjligt.
- Hur stor strömmen I_1 är kan beräknas via strömmen I_2 , som skall flöda genom lasten; strömmen I_1 är lika med strömmen I_2 dividerat på transformatorns omsättning N , eftersom

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

vilket kan transformeras till

$$I_1 = \frac{I_2}{N}$$

- Vi utgår då från att en last R_2 ansluts mellan den positiva matningsspänningen V_{CC} och jord på sekundärsidan, vilket medför att strömmen I_2 flödar genom denna. En lika stor last skall kunna anslutas mellan den negativa matningsspänningen V_{EE} och jord. Lika stor ström skall då kunna flöda genom lasten, vilket medför att de två strömmarna på sekundärsidan är samma:

$$I_2 = I_3$$

- Precis som tidigare så väljer vi säkring utifrån storleken på strömmen I_1 på primärsidan; beroende på hur stor denna ström är så väljer vi hur mycket större säkringens märkström I_{FN} skall vara:
 1. Ifall strömmen I_1 är mindre än ca 2 A så kan I_{FN} sättas ca 2,5 gånger högre än I_1 .
 2. Ifall strömmen I_1 ligger mellan ca 2–8 A så kan I_{FN} sättas ca 1,5 gånger högre än I_1 .
 3. Ifall strömmen I_1 överstiger ca 8 A så kan I_{FN} sättas ca 1,2 gånger högre än I_1 .

1.6.6 - Exempel på dimensionering av transformator med dubbel sekundärlindning

- Antag att primärspänningen U_1 är lika med 230 V och att vi önskar en sekundärspänning på ± 50 V, vilket betyder att den positiva matningsspänningen V_{CC} är 50 V och V_{EE} är -50 V, se figuren till höger.
- Sekundärspänningen U_2 är lika med den positiva matningsspänningen V_{CC} , alltså 50 V, eftersom U_2 är spänningsskillnaden mellan V_{CC} samt jordpunkten:

$$U_2 = V_{CC} - 0 = 50 \text{ V}$$

- Samtidigt är sekundärspänningen U_3 lika med absolutbeloppet av den negativa matningsspänningen V_{EE} , alltså 50 V, eftersom U_3 är lika med spänningsskillnaden mellan jordpunkten och V_{EE} :

$$U_3 = 0 - V_{EE} = 0 - (-50) = 50 \text{ V}$$

- Som vi har sett tidigare så är därmed de två sekundärlindningarna identiska:

$$N_2 = N_3,$$

eftersom förhållandet mellan spänningsfall samt antalet lindningsvarv i en transformator är följande:

$$\frac{U_2}{U_3} = \frac{N_2}{N_3}$$

- Eftersom sekundärspänningarna U_2 och U_3 är identiska så blir ration U_2 / U_3 lika med ett,

$$U_2 = U_3,$$

som kan transformeras till

$$\frac{U_2}{U_3} = 1,$$

vilket medför att ration N_2 / N_3 också är lika med ett:

$$\frac{N_2}{N_3} = 1,$$

vilket i sin tur betyder att sekundärlindningarna är identiska, då

$$\frac{N_2}{N_3} = 1,$$

som kan transformeras till

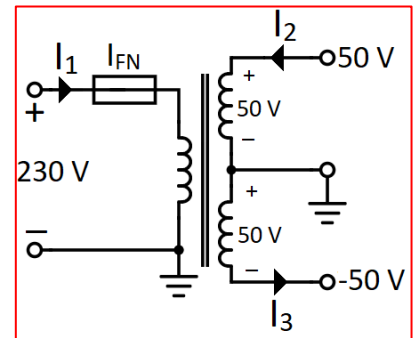
$$N_2 = N_3$$

- Därmed så blir omsättningen N_1 / N_2 lika med 4,6, eftersom omsättningen är lika med ration mellan primärspänningen U_1 och U_2 :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{50} = 4,6$$

- Samtidigt blir omsättningen N_1 / N_3 också lika med 4,6, eftersom omsättningen är lika med ration mellan primärspänningen U_1 och U_3 .

$$\frac{N_1}{N_3} = \frac{U_1}{U_3} = \frac{230}{50} = 4,6$$



Enfastransformator med dubbel sekundärlindning, som i detta fall möjliggör två sekundärspänningar, en på 50 V samt en på -50 V.

Notera att spänningsfallet över respektive lindning är samma, samtidigt som strömmarna genom lindningarna också är lika stora.

Elektroteknik

- När transformatorns omsättning N har fastställts utifrån primär- och sekundärspänningen U_1 och U_2 , så kan lindningarnas induktans L_1 , L_2 och L_3 fastställas med formeln

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{L_1}{L_3} = N^2$$

där L_2 och L_3 skall vara lika stora:

$$L_1 = L_2$$

- För enkelhets skull beräknas ration L_1 / L_2 . För en primärspänning U_1 på 230 V samt en sekundärspänning U_2 på 50 V, så blir transformatorns omsättning N lika med 4,6, eftersom

$$N = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{50} = 4,6$$

- Ration mellan primär- och sekundärlindningens induktans L_1 / L_2 bör då hamna på en faktor 4,6 i kvadrat, vilket innebär en faktor 21,16, då

$$\frac{L_1}{L_2} = N^2 = 4,6^2 = 21,16$$

- Formeln ovan kan transformeras till

$$L_1 = 21,16 * L_2,$$

vilket indikerar att primärsidans induktans L_1 bör sättas 21,16 gånger högre än sekundärsidans induktans L_2 .

- Eftersom sekundärlindningarnas induktanser L_2 och L_3 skall vara lika stora, så gäller även att

$$L_1 = 21,16 * L_3$$

- Som vi såg tidigare så medför detta att om de två sekundärlindningarna L_2 och L_3 sätts till 1 μH var:

$$L_2 = L_3 = 1 \mu H,$$

så bör primärlindningens induktans L_1 sättas till omkring 21,16 μH , då

$$L_1 = 21,16 * L_2 = 21,16 * 1 \mu = 21,16 \mu H$$

- Närmaste standardvärde är 22 μH , som vi därmed använder:

$$L_1 = 22 \mu H$$

- Som nämndes tidigare så kan det vara fördelaktigt att välja ett något högre värde på primärlindningens induktans L_1 än beräknat, vilket vi gjorde i detta fall, då vi kan räkna med att en viss mängd effektförluster kommer medför något minskade sekundärspänningar U_2 och U_3 .
- Genom att sätta primärlindningens induktans L_1 till ett lite högre värde, så kommer sekundärspänningar U_2 och U_3 höjas något, förutsatt att effektförlusterna är noll. I praktiken så lär då U_2 och U_3 hamna mycket nära specificerat värde, vilket i detta fall är ± 50 V.

Elektroteknik

- Antag att en last R_L på 10Ω ansluts på sekundärsidan. Lasten skall kunna placeras på två sätt, antingen mellan den positiva matningsspänningen V_{CC} (50 V) och jord eller den negativa matningsspänningen V_{EE} (-50 V) och jord, men inte samtidigt.
- I detta fall ansluts lasten mellan den positiva matningsspänningen V_{CC} (50 V) och jord. Därmed så blir spänningsfallet över lasten lika med 50 V, vilket medför att strömmen I_2 genom lasten blir 5 A, eftersom

$$I_2 = \frac{V_{CC} - 0}{R_L} = \frac{50 - 0}{10} = 5 \text{ A}$$

- Därmed så skall strömmen som flödar genom lasten bli 5 A, oavsett hur lasten ansluts. Därmed så sätter vi de två sekundärströmmarna I_2 och I_3 till 5 A:

$$I_2 = I_3 = 5 \text{ A}$$

- Därmed så blir transformatorns primärström I_1 ungefär lika med 1,1 A, eftersom

$$N = \frac{I_2}{I_1},$$

som kan transformeras till

$$I_1 = \frac{I_2}{N} = \frac{5}{4,6} \approx 1,1 \text{ A}$$

- För en primärström I_1 på ca 1,1 A så kan vi som tumregel sätta säkringens märkström I_{FN} ca 2,5 gånger högre än I_1 , alltså till ca 2,7 A, eftersom

$$I_{FN} \approx 2,5 * I_1 \approx 2,5 * 1,1 \approx 2,7 \text{ A}$$

- Eftersom effekten P på primärsidan vid normaldrift är ungefär lika med 250 W:

$$P = U_1 * I_1 \approx 230 * 1,1 \approx 250 \text{ W},$$

så bör transformatorns märkeffekt P_N sättas till 250 W:

$$P_N = 250 \text{ W}$$

- För att skapa en sådan transformator så kan vi sätta antalet lindningsvarv på de två sekundärspänningarna är 500 varv var:

$$N_2 = N_3 = 500$$

- Därmed så behövs 2300 varv på primärsidan, eftersom omsättningen N_1 / N_2 är 4,6:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{50} = 4,6,$$

vilket innebär att primärlindningen N_1 måste vara 4,6 gånger högre än sekundärlindningen N_2 , eftersom

$$\frac{N_1}{N_2} = 4,6,$$

vilket kan transformeras till

$$N_1 = 4,6 * N_2$$

- Eftersom sekundärlindningen N_2 är lika med 500 så behöver primärlindningen N_1 därmed sättas till 2300, eftersom

$$N_1 = 4,6 * N_2 = 4,6 * 500 = 2300$$

Modifikation av märkeffekten ifall transformatorn skall kunna förse två olika laster med ström samtidigt:

- Om transformatorn skall kunna förse två laster med ström samtidigt, där den ena är ansluten mellan den positiva matningsspänningen V_{CC} och jord, medan den andre är ansluten mellan jord och den negativa matningsspänningen V_{EE} , så måste transformatorns märkeffekt P_N ökas, eftersom primärströmmen I_1 måste ökas.
- Antag att vi fortfarande skall förse en last R_{L1} på $10\ \Omega$ mellan den positiva matningsspänningen V_{CC} och jord, samtidigt som vi skall förse en last R_{L2} på $20\ \Omega$ mellan den negativa matningsspänningen V_{EE} och jord.

- Precis som i föregående exempel så blir strömmen I_2 som flödar genom lasten R_{L1} lika med 5 A, eftersom

$$I_2 = \frac{V_{CC} - 0}{R_{L1}} = \frac{50 - 0}{10} = 5\ A$$

- Strömmen I_3 som flödar genom lasten R_{L2} blir 2,5 A, eftersom

$$I_3 = \frac{0 - V_{EE}}{R_{L2}} = \frac{0 - (-50)}{20} = \frac{50}{20} = 2,5\ A$$

- Totalt så blir därmed den totala sekundärströmmen I_{23} lika med 7,5 A, eftersom

$$I_{23} = I_2 + I_3 = 5 + 2,5 = 7,5\ A$$

- Storleken på primärströmmen I_1 måste nu beräknas via båda sekundärströmmarna I_2 och I_3 . Omsättningen mellan primärlindningen N_1 samt sekundärlindningarna N_2 samt N_3 är fortfarande 4,6 i båda fall, eftersom

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{50} = 4,6$$

samt

$$N = \frac{N_1}{N_3} = \frac{U_1}{U_3} = \frac{230}{50} = 4,6$$

- Därmed så kan vi beräkna primärströmmen I_1 via de två sekundärströmmarna I_2 och I_3 samt transformatorns omsättning N :

$$I_1 = \frac{I_2}{N} + \frac{I_3}{N} = \frac{I_2 + I_3}{N} = \frac{5 + 2,5}{4,6} \approx 1,6\ A$$

- Notera att vi hade direkt kunnat beräkna primärströmmen I_1 ur den totala sekundärströmmen I_{23} samt transformatorns omsättning N och ändå fått samma resultat:

$$I_1 = \frac{I_{23}}{N} = \frac{7,5}{4,6} \approx 1,6\ A$$

- På grund av att primärströmmen I_1 har ökat så måste också transformatorns märkeffekt P_N ökas, eftersom vi utgår från transformatorns effektförbrukning P på primärsidan för att välja märkeffekt P_N :

$$P_N \approx P = U_1 * I_1 \approx 230 * 1,6 = 375\ W$$

- Vi väljer därmed en transformator vars märkeffekt P_N är så nära 375 W som möjligt.
- För en primärström I_1 på ca 1,6 A så kan vi som tumregel sätta säkringens märkström I_{FN} ca 2,5 gånger högre än I_1 , alltså till ca 4 A, eftersom

$$I_{FN} \approx 2,5 * I_1 \approx 2,5 * 1,6 \approx 4\ A$$

- Därmed så väljer vi en säkring vars märkström I_{FN} är så nära 4 A som möjligt.