

Appendix B

Trefassystem

B.1 Olika spänningssystem

Likspänning

Likspänning är numera mycket ovanlig vid allmän distribution men förekommer fortfarande i industrianläggningar. Likström används där likströmmotorns gynnsamma egenskaper kan utnyttjas, t ex för traverser och hissar. Vi konstaterar att likströmsmotorer kan drivas från växelströmsnätet via strömriktare. För manöverändamål används ofta likström. Avbrottsfri likspänning kan vidare lätt erhållas med hjälp av ackumulatorer.

En likström kan vara besvärlig att bryta eftersom en kraftig ljusbåge ofta uppstår vid stora strömmar. Strömbrytare och kontaktorer för växelström har ofta en betydligt mindre brytförmåga vid likström eller är ofta till och med helt obrukbara i likströmsanläggningar. Vanliga proppsåkringar är användbara vid både likström och växelström.

Trefas växelspänning

Ett *trefassystem* har tillgängligt tre *växelspänningar* som är separerade i fas 120° från varandra. Alla tre spänningarna är oftast genererade i samma maskin. En trefaslast kan utnyttja alla tre spänningarna från en trefaskälla.

Summan av ögonblicksvärdena är alltid noll. Vidare gäller att ögonblicksvärdet av effekten i ett trefasnät är konstant. Det är denna egenskap som gör trefassystem så attraktiva för att driva t ex trefasmotorer, eftersom momentet blir jämnt i stationär drift. Denna egenskap är analog med att en sexcylindrig förbränningsmotor går jämnare än en encylindrig.

B.2 Det svenska trefas-systemet

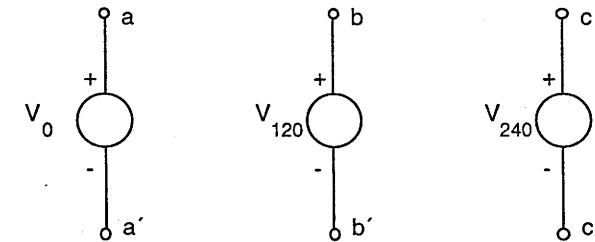
Det i Sverige vanligaste växelströmssystemet är trefas växelspänning med frekvensen 50 Hz. För speciella ändamål förekommer högre frekvenser, t ex 400-700 Hz för vissa träbearbetningsmaskiner eller i elektriska motorsystem i flygplan. Vid järnvägsdrift används enfass 16kV, $16^{2/3}$ Hz.

Numera används 230/400V i det allmänna distributionssystemet. Trefasiga belastningar skall ha märkspänningen 380V. Enfasiga belastningar och bruksföremål ansluts i detta system mellan fasledare och nolledare. Dessa föremål skall alltså ha märkspänningen 220V. I vissa äldre anläggningar (och på LTH:s laboratorier) används spänningssystemet 3 x 220V. Trefasiga belastningar skall ha märkspänningen 220V. Bruksföremål ansluts mellan två

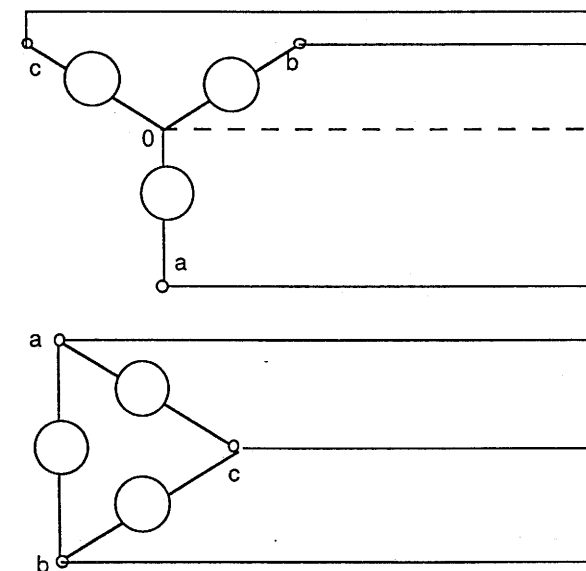
ytterledare och skall även de ha märkspänningen 220V. Nolledaren får ej belastas vid detta system. I industriella system är märkspänningen 400/690V.

B.3 Grundläggande kopplingar, Y och D

I den generator som bildar späningskälla för ett trefassystem kan man tänka sig tre separata späningskällor, som visas i figur B.1.



Figur B.1. En trefaskälla sedd som tre separata enfass växelströmskällor. Alla har spänningen V , men är fäsförskjutna 120° relativt varandra.



Figur B.2. De två typerna av trefasförbindningar, Y-koppling (överst) och D-koppling.

De sex terminalerna till lindningarna, a , a' , b , b' , c och c' kan förbindas som tre helt separata späningskällor. Det normala är dock att man förbinder några av terminalerna med varandra på olika sätt. Figur B.2 visar de två sätt som används för att generera trefasspänningar. Om a' , b' och c' förbinds i en

punkt, nollpunkten, får man en Y-koppling (stjärnkoppling). Förbinds i stället a med b', b med c' och c med a' erhåller man i stället en D-koppling (triangelkoppling; ofta kallas den också för Δ -koppling av intuitiva skäl).

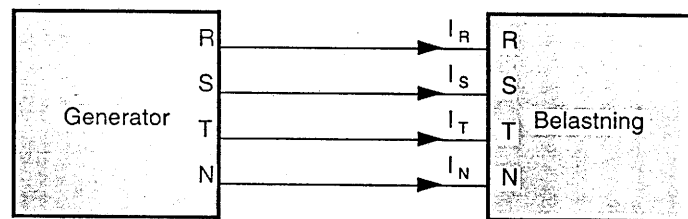
I Y-koppling kan man också föra fram en fjärde ledning, den s.k. nollan, som angetts i figur B.2. I D-kopplingen finns ingen nolla och endast ett trefasystem kan definieras.

När alla tre spänningarna är lika och fasförskjutna 120° i förhållande till varandra talar man om ett **symmetriskt (balanserat) trefassystem**. Vidare skall impedanserna i alla tre kretsarna vara lika, vilket också betyder att fasströmmarna är lika och förskjutna 120° i förhållande till varandra. Likaså förbrukas lika mycket aktiv och reaktiv effekt i de tre faserna.

I ett **osymmetriskt (obalanserat) nät** är inte alla dessa villkor uppfyllda. Vi kommer i kursen att tala endast om symmetriska nät även om osymmetriska förekommer i praktiken. Det betyder att man inte direkt får generalisera de resultat som vi presenterar om symmetriska nät till osymmetriska. Industriella motordrifter är oftast belastade trefasigt och är balanserade. Då man försörjer enfaslaster från trefasnät gör man stora ansträngningar att belasta varje fas lika mycket för att behålla symmetrin i nätet.

B.4 Definitioner och grundläggande egenskaper

Som grund för trefassystemets beskrivning väljer vi en enkel överföring mellan en generator (trefas) och en belastning (trefas). Överföringen eller förbindelsen utgöres av *fyra* ledare, betecknade R, S, T och N eller L1, L2, L3 och L0 enligt nya normer.



Figur B.3. Grundläggande beteckningar för trefassystemet

Vi förutsätter symmetriska system, där ej annat säges och antar att spänningar och strömmar varierar sinusformigt med tiden.

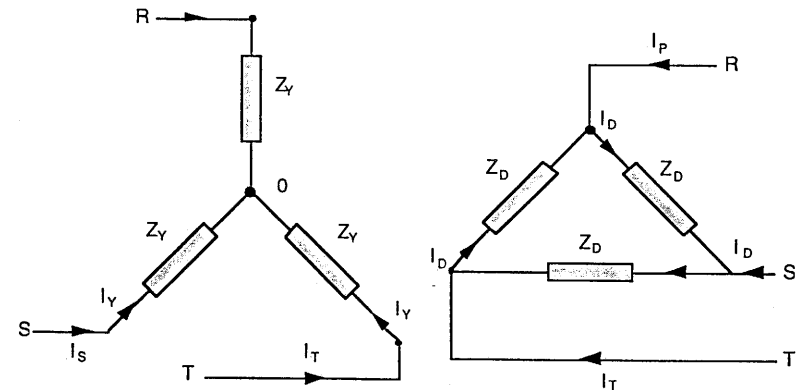
Nedan sammanfattar vi några begrepp och beteckningar som användes i samband med trefassystem och refererar till figur B.3:

- nolledare (N):** ledare ansluten till generatorns nollpunkt. Nolledaren är normalt jordad. Ström i nolledaren betecknas I_N ;

- yterledare (R, S, T):** ledare, som normalt har spänning till jord. Kallas även för *fasledare*;
- systemspänning:** spänning mellan de ledare i systemet som har den största inbördes spänningen (effektivvärde);
- huvudspänning ($U_h, U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}$):** spänning mellan två yterledare;
- fasspänning (U_f, U_R, U_S, U_T):** spänning mellan yterledare och nolledare;
- linjeström (I_l, I_R, I_S, I_T):** ström i yterledare.

Vid analys av trefassystem arbetar man med de två grundkopplingarna, Y-koppling och D-koppling. Har belastningen ej någon av dessa kopplingar, kan den med hjälp av kretsteorins satser omformas till någon av dessa kopplingar eller till en kombination av båda. Flyter ström i nolledningen, måste den ekvivalenta belastningen innehålla en stjärnkoppling. Vi definierar vidare strömmar i Y- resp D-koppling:

- strömmen I_Y : strömmen genom stjärnstråle i Y-kopplad belastning;
- strömmen I_D : strömmen genom triangelnsida vid D-kopplad belastning.



Figur B.4. Beteckningar för strömmar i Y- resp D-kopplingar.

Där nolledare saknas kan man definiera fasspänningarna enligt nedan. Mellan fas- och huvudspänningarna gäller sambanden

$$\begin{aligned} \bar{U}_{RS} &= \bar{U}_R - \bar{U}_S \\ \bar{U}_{ST} &= \bar{U}_S - \bar{U}_T \\ \bar{U}_{TR} &= \bar{U}_T - \bar{U}_R \end{aligned} \quad (B.1)$$

Som synes är ekvationerna ej oberoende, varför ett ytterligare villkor krävs för att entydigt definiera fasspänningarna. Finns nollledare, är potentialen hos denna ledare det extra villkor, som fordras. Saknas nollledare införes *normalt* som extra villkor att för varje tidsögonblick gäller

$$u_R + u_S + u_T = 0$$

Detta villkor motsvarar en *fiktiv* nollpunkt, som exempelvis kan åstadkommas om tre lika resistanser Y-kopplas och anslutes till ytterledarna. Y-nollpunkten utgör den fiktiva (konstgjorda) nollpunkten. I speciella fall kan det vara lämpligare att använda en annan nollpunkt, t ex nollpunkten hos den med (den osymmetriska) belastningen ekvivalenta Y-kopplingen.

B.5 Symmetriskt trefassystem

Vi skall här analysera de viktigaste egenskaperna hos symmetriska trefassystem och förutsätter därför att spänningar och strömmar är sinusformiga och färförskjutna 120° i förhållande till varandra. De olika spänningarna kan då skrivas på formen

$$u_R = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \phi_1)$$

$$u_S = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \phi_2)$$

$$u_T = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \phi_3)$$

där vi noterar att amplituderna är lika. Dessutom gäller att

$$\phi_1 - \phi_2 = \phi_2 - \phi_3 = \phi_3 - \phi_1 = 120^\circ = \frac{2\pi}{3} \text{ rad}$$

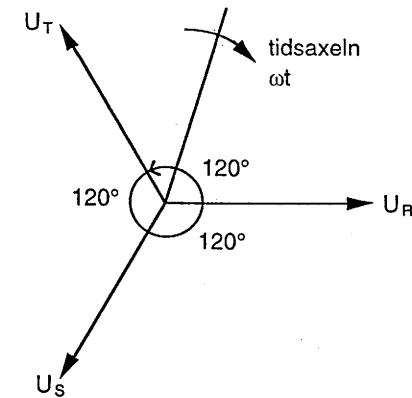
Vi kan nu skriva spänningarna på formen

$$u_R = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \phi_1)$$

$$u_S = \sqrt{2}U \sin\left(\omega t + \phi_1 - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_T = \sqrt{2}U \sin\left(\omega t + \phi_1 + \frac{2\pi}{3}\right) = \sqrt{2}U \sin\left(\omega t + \phi_1 - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Spänningarna kan åskådliggöras i ett visardiagram, där de roterar moturs i förhållande till tidsaxeln. Visardiagrammet kan visa spänningarna i både Y- och D-kopplingar. Vare sig vi visar fasspänningar eller huvudspänningar ser visardiagrammet ut som i figur B.5, men med olika amplitud.



Figur B.5. Visardiagram för positiv resp negativ fasföljd i trefassystem.

Vi antar nu att *R*-fasen har 0° färförskjutning (*R*-fasen sägs vara referensfas). Då kan de tre spänningarna skrivas på komplex form enligt nedan i det symmetriska trefassystemet:

$$\begin{aligned}\bar{U}_R &= U \\ \bar{U}_S &= U e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ \bar{U}_T &= U e^{-j\frac{4\pi}{3}}\end{aligned}\quad (\text{B.2})$$

Genom att betrakta figur B.5 inses att summan av ögonblicksvärdena för både huvudspänningar och fasspänningar är noll:

$$u_R + u_S + u_T = 0$$

Likaså är summan av vektorerna noll,

$$\bar{U}_R + \bar{U}_S + \bar{U}_T = 0 \quad (\text{B.3})$$

Är även belastningen symmetrisk gäller på samma sätt att

$$\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T = 0 \quad (\text{B.4})$$

och strömmen genom nollledaren noll,

$$\bar{I}_N = 0$$

Nollledaren behövs därmed inte i det här fallet. Vi har på detta sätt fått ett s k tredarsystem. Det normala är fyrledarsystemet, ibland kan jord användas

som nollledare varför exempelvis kraftledningar bara har (multipler av) tre ledare.

B.6 Symmetriska belastningar i trefasnät

Som vi noterat tidigare så förblir trefasnätet symmetriskt om varje fas i nätet har lika stor impedans. Vi skall nu analysera belastningarna för Y- och D-kopplingar.

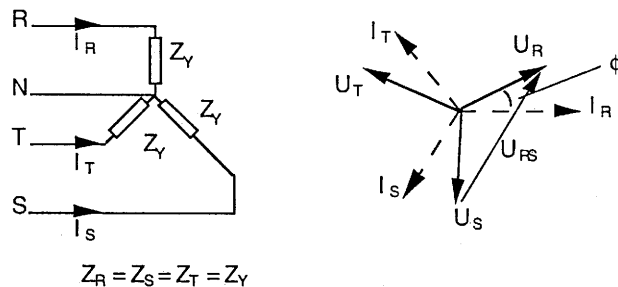
Y-kopplad belastning

Figur B.6 visar en symmetrisk belastning i Y-koppling samt det resulterande visardiagrammet för strömmar och spänningar kring belastningen. Ur visardiagrammet erhålles huvudspänningens effektivvärde

$$U_{RS} = \sqrt{3}U_R$$

eller allmänt

$$U_h = \sqrt{3}U_f \quad (\text{B.5})$$

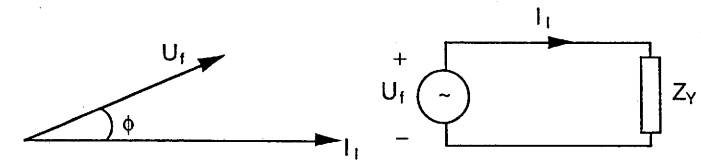


Figur B.6. Symmetrisk belastning i Y-koppling samt visardiagram för strömmar och spänningar.

Sambandet mellan spänning och ström i varje fas:

$$\bar{U}_f = \bar{Z}_Y \bar{I}_f$$

För ett symmetriskt trefasproblem är det tillräckligt att studera förhållandena i en fas. Vi noterar att spänningen är fassförskjuten vinkeln ϕ i förhållande till strömmen. Med andra ord, impedansen Z_Y kan beskrivas som en komplex storhet $R + jX$ med argumentet ϕ .



Figur B.7. Representation av spänning och ström i en fas. Spänningen ligger före i fas.

Ur visardiagrammet figur B.6 och B.8 framgår att vid symmetrisk belastning gäller:

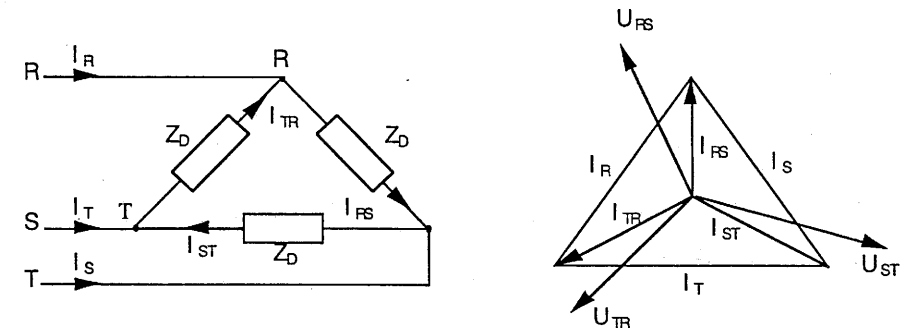
$$\begin{aligned} U_h &= \sqrt{3}U_f \\ I_l &= I_Y \quad (\text{Y-koppling}) \\ I_l &= \sqrt{3}I_D \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

I ord uttryckt innebär detta att för en Y-koppling är huvudspänningen (eller spänningen mellan två ytterledare) $\sqrt{3}$ gånger fasspänningen. Dessutom är linjeströmmen densamma som strömmen som flyter genom en stjärnstråle.

För en D-koppling gäller (se figur B.2) att spänningen över en fas är en huvudspänning. Linjeströmmen är $\sqrt{3}$ gånger strömmen genom en triangelsida.

D-kopplad belastning

Figur B.8 visar en symmetrisk belastning i D-koppling samt det resulterande visardiagrammet för strömmar och spänningar kring belastningen.



Figur B.8. Symmetrisk belastning i D-koppling samt visardiagram för strömmar och spänningar.

Sambandet mellan ström genom triangelsida och linjeströmmen skrives:

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{RS} - \bar{I}_{TR}$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{ST} - \bar{I}_{RS}$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{TR} - \bar{I}_{ST}$$

Ur visardiagrammet erhålles linjeströmmens effektivvärde:

$$I_R = \sqrt{3} I_{RS} \quad (\text{B.7})$$

$$I_R = I_S = I_T = I_l \quad (\text{B.8})$$

Ekvivalent Y-fas

För att underlätta beräkningarna vid symmetriska belastningsfall, transformeras de ingående impedanserna till en ekvivalent Y-koppling. Då både spänningar och belastningar är symmetriska, kan vi nöja oss med att bara räkna på en fas. Vi har därmed överfört det ursprungliga problemet till ett enfasigt problem.

Exempel 1:

Vid mätning på trefasiga elektriska maskiner vill man bestämma lindningarnas resistans omräknad till ekvivalent Y-fas. Vid uppmätning av lindningsresistansen mäter man mellan två fasuttag. Medelvärde R_x av de tre uppmätta resistanserna användes vid den fortsatta behandlingen.

Om lindningen är Y-kopplad gäller:

$$R_Y = \frac{R_x}{2}$$

Om lindningen är D-kopplad gäller:

$$R_D = \frac{3}{2} R_x \text{ och } R_{ekvY} = \frac{R_D}{3} = \frac{R_x}{2}$$

Oberoende av kopplingen gäller:

$$R_{ekvY} = \frac{R_x}{2}$$

För mer invecklade kopplingar gäller samma samband, vilket följer av att de båda kopplingarna skall vara ekvivalenta.

Exempel 2: En trefasig symmetrisk belastning

En trefas motor har följande indata:

Huvudspänning 380V, linjeströmmar 11 A, aktiv trefaseffekt 6000W.

Oavsett om motorn i verkligheten är kopplad i Y eller D, antar vi att vår beräkningsmodell är Y-kopplad. Eftersom vi har symmetri i de tre faserna, räcker det med att räkna på en fas. Vi väljer att räkna på *en ekvivalent Y-fas*, med följande indata:

Fasspänningen 220V, strömmen 11A och aktiva effekten 2000 W.

B.7 Trefaseffekter

Ögonblickseffekten är konstant i ett symmetriskt trefassystem. Man visar detta genom rättframma beräkningar. Effekten $p(t)$ kan skrivas

$$\begin{aligned} p_R(t) + p_S(t) + p_T(t) &= u_R(t)i_R(t) + u_S(t)i_S(t) + u_T(t)i_T(t) = \\ &= \sqrt{2}U_f I_l \left\{ \sin \omega t \sin(\omega t + \phi) + \right. \\ &\quad \left. + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} = \\ &= U_f I_l \left\{ \cos \phi - \cos(2\omega t + \phi) + \cos \phi - \cos\left(2\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \cos \phi - \cos\left(2\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} = \\ &= 3U_f I_l \cos \phi \end{aligned}$$

Den sista termen är oberoende av tiden. I belastningen förbrukas komplexa effekten $\bar{S} = P + jQ$

$$\bar{S} = \bar{U}_R \bar{I}_R^* + \bar{U}_S \bar{I}_S^* + \bar{U}_T \bar{I}_T^* \quad (\text{B.9})$$

Vid symmetriska förhållanden gäller dessutom att effekten i varje fas är lika,

$$\bar{U}_R \bar{I}_R^* = \bar{U}_S \bar{I}_S^* = \bar{U}_T \bar{I}_T^* = U_f I_l (\cos \phi + j \sin \phi) = U_f I_l e^{j\phi}$$

Den totala effekten är som synestre gånger effekten i varje fas,

$$\bar{S} = 3U_f I_l e^{j\phi} = \sqrt{3}U_h I_l e^{j\phi} \quad (\text{B.10})$$

Sammanfattningsvis gäller:

skenbara effekten	$S = \sqrt{3}U_h I_l$	VA
	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	VA
aktiva effekten	$P = \sqrt{3}U_h I_l \cos \phi$	W
reaktiva effekten	$Q = \sqrt{3}U_h I_l \sin \phi$	var

Vi kan summera ett symmetriskt trefasnät med att både strömmar, spänningar och effekter får ganska enkla uttryck, vare sig man har Y- eller D-kopplingar i konfigurationen. Denna symmetri tillåter oss därför att analysera systemet genom att betrakta endast *en* av de tre faserna.

B.8 Mätning av ström och spänning i trefassystem

Vid mätning är spänningarna mer eller mindre osymmetriska, vilket även gäller strömmarna. För det fall att belastningen och systemet är "nästan" symmetriska, förenklar man bearbetningen genom att överföra problemet till ett symmetriskt fall.

Tre spänningar och tre strömmar mäts med effektivvärdesmätande instrument. I vissa fall kan det vara motiverat att dessutom mäta t ex likriktat medelvärde. Det likriktade medelvärdet för spänningen (detta är **spänningstidyt** som är en konsekvens av induktionslagen) över en lindningsfas hos en transformator ger besked om flödets topp till topp-värde.

Vid *spänningsmätning* uppmätes de tre huvudspänningarna och medelvärdet av dessa användes vid beräkningarna. Uppmätningen kan antingen ske med tre voltmetrar eller med en voltmeter och en voltmeteromkopplare. Man antar vid beräkningarna att man har en fullkomligt symmetrisk trefasspänning med $U_h = U_{h,medel}$. I vissa fall kan det vara motiverat att mäta fasspänningarna på motsvarande sätt och lägga dessa spänningar till grund för beräkningarna.

De tre *linjeströmmarna* uppmäts på analogt sätt och medelvärdet I_{med} användes vid beräkningarna. Man räknar då på en ekvivalent symmetrisk last, sådan att denna last tar strömmen I_{med} om den ansluts till den tänkta symmetriska spänningskällan ovan.

Instrumentomkopplare finns av olika typer. Med voltmeteromkopplare kan voltmeter, wattmeters spänningsspole, tungfrekvensmeter etc. inkopplas mellan godtyckliga ledare i systemet. Med amperemeteromkopplare inkopplas amperemeter, wattmeters strömspole etc. till godtycklig ledare i systemet, samtidigt som övriga

ledare blir opåverkade. Övervakningsinstrument är ofta inkopplade över instrumentomkopplare.

B.9 Effekt- och energimätning

Vid effektmätning och energimätning användes samma kopplingar. När vi talar om wattmetrar i det följande kan det vara både en kWh-mätare och en kvarh-mätare.

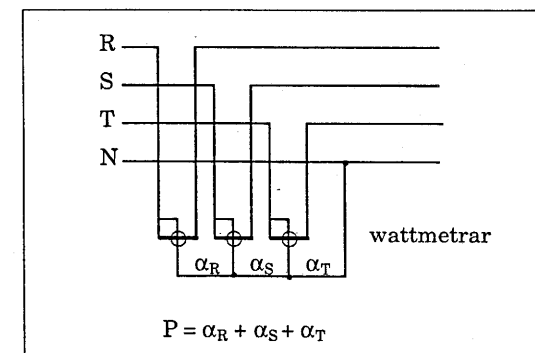
Tvåwattmetermetoden eller **trewattmetermetoden** kan användas vid mätning av effektens medelvärde. Vid mätningar av ögonblickseffekten kan t ex **Hallmultiplikator** eller fältplattor användas.

Trewattmetermetoden

Trewattmetermetoden kan användas vid alla typer av trefassystem, även om spänningarna och strömmarna har allmän kurvform. Metoden används vid energiuppmätning vid lågspänningsleveranser samt vid sådana högspänningsleveranser där man har höga krav på noggrannhet. Wattmetrarnas inkoppling framgår av figur B.9. Vi definierar

$$\alpha_R = \frac{1}{T} \int_0^T u_R i_R dt \quad (\text{B.11})$$

samt motsvarande uttryck för S- och T-fasen.



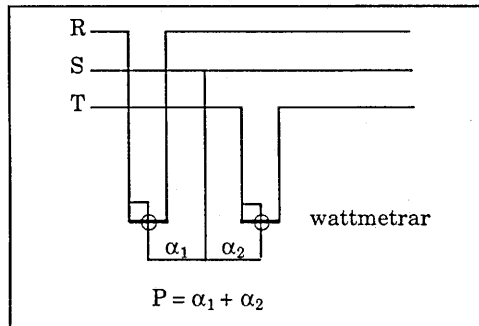
Figur B.9. Wattmeterinkoppling vid tre wattmetermetoden. Spänningen mäts mellan respektive fas och nolla, medan strömmarna mäts i varje fas.

Tvåwattmetermetoden

Tvåwattmetermetoden kan användas om nollledare saknas. Detta framgår av följande härledning:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{T} \int_0^T (u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T) dt = \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T (u_R - u_S) i_R dt + \frac{1}{T} \int_0^T (u_T - u_S) i_T dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_S (i_R + i_S + i_T) dt
 \end{aligned}$$

Den sista integralen är lika med noll, eftersom summan av strömmarna är noll när nolledare saknas. Den andra två integralerna mäts upp med respektive wattmeter såsom framgår av figur B.10.



Figur B.10. Inkoppling av wattmetrar vid tvåwattmetermetoden.

Den ena wattmetern får om $\phi > \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow \cos \phi < 0,5$ ett negativt utslag, varför t ex anslutningarna till strömspolen får omkastas. Det då erhållna positiva utslaget räknas som negativt utslag vid beräkning av effekten. Om de båda wattmetersystemen är sammanbyggda i samma instrument kommer summaeffekten att bli korrekt utan omkopplingar. Vid mätning på belastningar med låg effektfaktor, t ex en tomgående transformator, erhålles resultatet som skillnaden mellan två nästan lika stora tal. Det relativa felet i mätningen blir därför betydligt större än felet i de båda wattmeterutslagen. Tvåwattmetermetoden bör därför användas med omdöme och försiktighet.

Två-varmetersmetoden:

Är spänningen symmetrisk kan den reaktiva effekten uppmätas med två wattmetrar enligt följande. Den reaktiva effekten är förskjuten 90° i förhållande till den aktiva, varför man kan skriva följande samband:

$$Q = \text{Im } \bar{S} = \text{Re } \bar{S} e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

Komplexa effekten (B.9) kan skrivas om på formen

$$\begin{aligned}
 \bar{S} &= \bar{U}_R \bar{I}_R^* + \bar{U}_S \bar{I}_S^* + \bar{U}_T \bar{I}_T^* = \\
 &= (\bar{U}_R - \bar{U}_S) \bar{I}_R^* + (\bar{U}_T - \bar{U}_S) \bar{I}_T^* + \bar{U}_S (\bar{I}_R^* + \bar{I}_S^* + \bar{I}_T^*)
 \end{aligned}$$

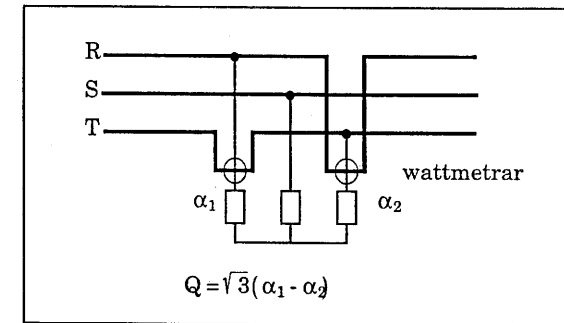
Den sista termen är noll. Vid symmetriskt system utan nolla får man då

$$\bar{S} = \sqrt{3} \bar{U}_R \bar{I}_R^* e^{j\frac{\pi}{6}} + \sqrt{3} \bar{U}_T \bar{I}_T^* e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

Reaktiva effekten kan skrivas som

$$\begin{aligned}
 \bar{Q} &= \sqrt{3} \text{Re} \left\{ \bar{U}_R \bar{I}_R^* e^{j\frac{\pi}{6}} e^{-j\frac{\pi}{2}} + \bar{U}_T \bar{I}_T^* e^{-j\frac{\pi}{6}} e^{-j\frac{\pi}{2}} \right\} = \\
 &= \sqrt{3} \text{Re} \{ \bar{U}_R \bar{I}_T^* - \bar{U}_T \bar{I}_R^* \}
 \end{aligned}$$

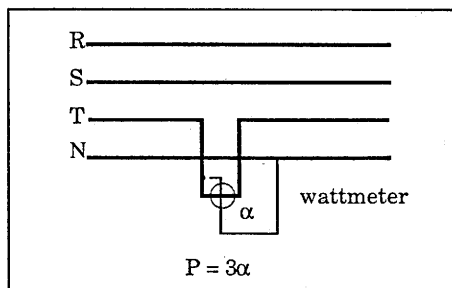
Den ena wattmetern skall matas med strömmen I_T och spänningen U_R och den andra wattmetern med strömmen I_R och spänningen U_T . Då ju nolledare saknas, får man ordna en konstgjord nollpunkt enligt figur B.11.



Figur B.11. Mätning med två-varmetersmetoden

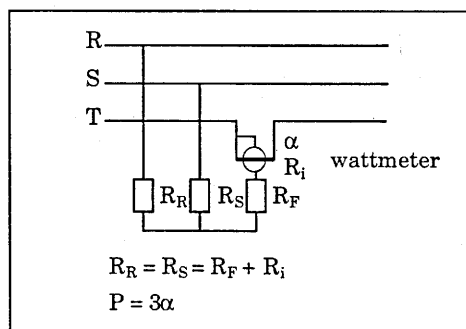
Enwattmetermetoden:

Vid symmetrisk spänning och symmetrisk belastning med tre ytterledare och nolledare kan effekten uppmätas med hjälp av endast en wattmeter. Wattmetern inkopplas som i figur B.12, där α motsvarar en medeleffekt över en fas i analogi med (B.11).



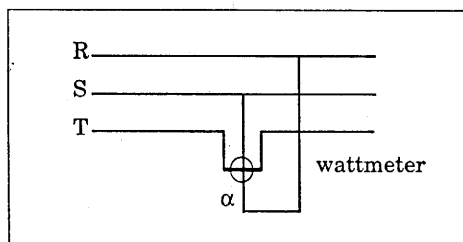
Figur B.12. Mätning i trefassystem med en wattmeter.

Strömspolen är inkopplad i en ytterledare och spänningsspolen mellan denna ytterledare och nollledaren. Saknas nollledaren kan en s.k. konstgjord nollpunkt anordnas enligt figur B.13.



Figur B.13. Användning av konstgjord nollpunkt vid en-wattmetermetoden

Till laborierewattmetrar hör ofta ett speciellt förkopplingsmotstånd, kopplat för mätning med konstgjord nollpunkt. Skall den reaktiva effekten uppmätas, kan wattmetern inkopplas som i figur B.14, där $Q = \sqrt{3}\alpha$

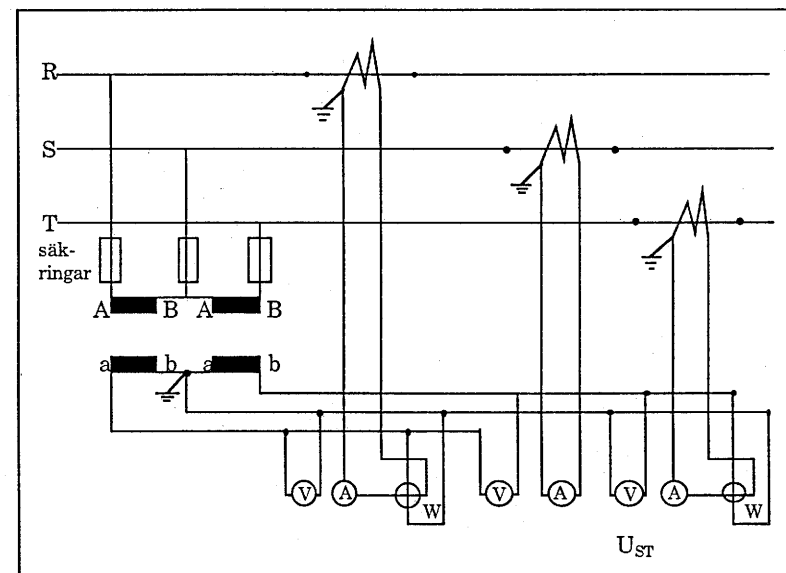


Figur B.14. Mätning med en-varmetermetoden

Är spänningssystemet symmetriskt, kan tre wattmetrar inkopplas som i figur B.14 för att uppmäta den reaktiva effekten. Är spänningssystemet osymmetriskt, används ett speciellt förkopplingsdon, som fasvrider spänningen över spänningsspolarna så att spölsänningen ligger $\pi/2$ efter motsvarande fassänningen.

Fullständigt kopplingsschema för mätning på trefasig belastning:

Figur B.15 visar en sammanställning av vilka inkopplingar av ström-, spännings- och effektmätare som måste göras vid en komplett mätning på ett trefassystem.



Figur B.15. Inkoppling av volt-, ampere- och wattmetrar vid en komplett mätning på trefassystem.