Tabel A6.3 Tabel over effekter – ubalanceret system.

Belastninger	Aktiv	Reaktiv	Tilsyneladende
L_1	$P = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot R}$	$Q = 0$	$S = P$
L_2	$P = 0$	$Q_L = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \omega L}$	$S = jQ_L$
L_3	$P = 0$	$Q_C = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{\omega C}}$	$S = -jQ_C$

Forudsættes en symmetrisk sinusformet spænding og følgende forhold gældende $R = \omega L = \frac{1}{\omega C}$, vil de aktive, reaktive og tilsyneladende effekter kunne regnes som i Tabel A6.3.

Da alle størrelserne P, Q_L og Q_C er lige store, vil effektfaktoren skulle fastsættes således:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{(P + jQ_L - jQ_C)} = \frac{P}{P} = 1$$

En effektfaktor $PF = 1$ skulle gerne tilkendegive et optimeret system med mindst muligt tab i overføringssystemet. Det er dog ikke tilfældet i eksemplet, da både induktansen og kapacitansen i eksemplet vil kunne kompenseres med mindre tab i lederne L_2 og L_3 til følge.

Balancerede trefasede system, hvor der eksisterer ikke-sinusformet spænding eller strøm, kan ligeledes lede til problemer, hvis det betragtes som tre enfasede systemer. Som eksempel kan der tages udgangspunkt i fx et balanceret system med symmetriske spændingsvektorer, hvor hver fasespænding har et indhold af hhv. 1., 3. og 5. harmoniske spændinger. Da 3. harmoniske spændinger ligesom 3. harmoniske strømme har nulsekvens (se afsnittet A6.4.5 Harmoniske strømmes sekvenser), har spændingen mellem to af faserne ikke et indhold af 3. harmoniske spændinger. Kun spændingen mellem fase og nul har et indhold af 3. harmoniske spændinger. Af den grund vil man få to forskellige resultater for den tilsyneladende effekt, afhængigt af om man betragter systemet som trefaset eller som tre enfasede systemer:

$$S_{\Delta \text{ enfaset}} \neq S_{\Delta \text{ trefaset}}$$
$$3 \cdot U_{RMS} \cdot I_{RMS} \neq \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{RMS} \cdot I_{RMS}$$
$$3 \cdot \sqrt{I_{1.h}^2 + I_{3.h}^2 + I_{5.h}^2} \cdot I_{RMS} \neq 3 \cdot \sqrt{I_{1.h}^2 + I_{5.h}^2} \cdot I_{RMS}$$

Af ovenstående grunde anbefales det ifm. med fastsættelse af effektfaktor, at systemer med ubalance og/eller harmoniske spændinger/strømme behandles ud fra et ækvivalent balanceret system, der har samme overføringstab som det ubalancerede system.

Først defineres en ækvivaleret strøm I_e:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \sum_h \left(\frac{K_{sh}}{K_{s1}} \cdot \left(I_{h_{L1}}^2 + I_{h_{L2}}^2 + I_{h_{L3}}^2 \right) + \frac{K_{shN}}{K_{s1}} \cdot \frac{r_{DC_N}}{r_{DC}} \cdot I_{h_N}^2 \right)} \qquad \text{[A6.28]}$$

hvor

- $I_{h_{L1}}$, $I_{h_{L2}}$, $I_{h_{L3}}$ og I_{h_N} er alle de harmonisk strømmes RMS-værdier i hhv. L1, L2, L3 og N [A]. Bemærk, at i dette tilfælde betragtes og inkluderes også den 1. harmoniske strøm i summeringerne, da $h = 1$ også indgår i ligningen
- K_x er faktorer, der tager højde for skin- og næreffekt:
  - K_{s1} er en faktor, der tager højde for skin- og næreffekt i faseledere for den 1. harmoniske strøm
  - K_{sh} er faktorer, der tager højde for skin- og næreffekt i faseledere for hvert tilfælde af harmoniske strømme inklusive tilfældet med den 1. harmoniske strøm
  - K_{shN} er faktorer, der tager højde for skin- og næreffekt i nulleder for hvert tilfælde af harmoniske strømme inklusive tilfældet med den 1. harmoniske strøm

Disse faktorer skal betragtes og fastsættes ud fra det aktuelle overføringssystems valgte ledermaterialer

- r_{DC} og r_{DC_N} er DC-resistanserne af hhv. faseleder og nulleder [Ω/km eller Ω/m]. Disse værdier skal fastsættes ud fra det aktuelle overføringssystems valgte ledermaterialer

Hvis skin- og næreffekt negligeres og nullederen har samme tværsnit og ledermateriale som faselederne, bliver beregningen selvsagt en del simplere. Det samme kan siges om trefasede overføringssystemer uden nul; også her bliver beregningen en del simplere, da sidste led i parentesen forsvinder grundet $I_{h_N} = 0$.

Søges der at regne effekttabet i overføringen, gøres det simpelt således:

$$\Delta P = 3 \cdot r_L \cdot l \cdot I_e^2$$

hvor

- r_L er resistansen i faseledere, f.eks. regnet som $r_L = r_{DC} \cdot K_{s1}$

Den ækvivaleret strøm I_e består af to dele:

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad [A6.29]$$

hvor de to dele kan regnes separat:

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\left(I_{1_{L1}}^2 + I_{1_{L2}}^2 + I_{1_{L3}}^2 \right) + \frac{K_{s1N}}{K_{s1}} \cdot \frac{r_{DC_N}}{r_{DC}} \cdot I_{1_N}^2 \right)} \quad [A6.30]$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \sum_{h \neq 1} \left(\frac{K_{sh}}{K_{s1}} \cdot \left(I_{h_{L1}}^2 + I_{h_{L2}}^2 + I_{h_{L3}}^2 \right) + \frac{K_{shN}}{K_{s1}} \cdot \frac{r_{DC_N}}{r_{DC}} \cdot I_{h_N}^2 \right)} \quad [A6.31]$$

Disse strømme kan kaldes hhv. den ækvivaleret 1. harmoniske strøm og den ækvivaleret forvrænget del af strømmen.

Negligeres skin- og næreffekt, og har nulleder samme tværsnit og ledermateriale som faseledere, fås disse to simple udtryk:

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{1_{L1}}^2 + I_{1_{L2}}^2 + I_{1_{L3}}^2 + I_{1_N}^2}{3}} \quad [A6.32]$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{\left(I_{H_{L1}}^2 + I_{H_{L2}}^2 + I_{H_{L3}}^2 + I_{H_N}^2 \right)}{3}} \quad [A6.33]$$

Herefter defineres en ækvivaleret spænding U_e:

$$U_e = \sqrt{\frac{3 \cdot \sum_{h} \left(U_{h_{L1}}^2 + U_{h_{L2}}^2 + U_{h_{L3}}^2 \right) + \xi \cdot \sum_{h} \left(U_{h_{L1L2}}^2 + U_{h_{L2L3}}^2 + U_{h_{L3L1}}^2 \right)}{9 \cdot (1 + \xi)}} \quad [A6.34]$$

hvor

- $U_{h_{L1}}$, $U_{h_{L2}}$, $U_{h_{L3}}$, $U_{h_{L1L2}}$, $U_{h_{L2L3}}$ og $U_{h_{L3L1}}$ er alle de harmonisk spændingers RMS-værdier i mellem hhv. faser og nul og mellem faser [V] Bemærk, at i dette tilfælde betragtes og inkluderes også den 1. harmoniske spænding i summeringerne, da $h = 1$ også indgår i ligningen

Faktoren ξ tager højde for hvorledes en samlet belastning er opdelt mellem trefasede belastninger og enfasede belastninger. Faktoren fastsættes således:

$$\xi = \frac{P_\Delta}{P_Y} \quad [A6.35]$$

- P_Y er andelen af enfasede belastninger balanceret som tre ækvivalerede resistanser R_Y forbundet i stjerne med fælles nul [W]
- P_Δ er andelen af trefasede belastninger (både trekantforbundet og stjerneforbundet uden nul) balanceret som tre ækvivalerede resistanser R_Δ forbundet i trekant [W]

Denne faktor kan være besværlig at fastsætte i praksis. Af den grund anbefaler standarden IEEE 1459-2010[1] at sætte den til 1 ved mangel på nærmere oplysninger. Derudover har en faktor $\xi \neq 1$ i ligningen kun relevans ved asymmetri i spændingerne, eller hvis spændingerne indeholder overharmoniske spændinger med nulsekvens, da disse spændinger, som nævnt før i dette afsnit, kun eksisterer mellem fase og nul. For yderligere info om faktoren henvises til standarden.

Sættes $\xi = 1$ fås følgende simplere udtryk:

$$U_{\mathrm{e}} = \sqrt{\frac{3 \cdot \sum_{\mathrm{h}} \left(U_{\mathrm{h_{L1}}}^2 + U_{\mathrm{h_{L2}}}^2 + U_{\mathrm{h_{L3}}}^2 \right) + \sum_{\mathrm{h}} \left(U_{\mathrm{h_{L1L2}}}^2 + U_{\mathrm{h_{L2L3}}}^2 + U_{\mathrm{h_{L3L1}}}^2 \right)}{18}} = \sqrt{U_{\mathrm{e1}}^2 + U_{\mathrm{eH}}^2} \qquad [A6.36]$$

$$U_{\mathrm{e1}} = \sqrt{\frac{3 \cdot \left(U_{\mathrm{1_{L1}}}^2 + U_{\mathrm{1_{L2}}}^2 + U_{\mathrm{1_{L3}}}^2 \right) + \left(U_{\mathrm{1_{L1L2}}}^2 + U_{\mathrm{1_{L2L3}}}^2 + U_{\mathrm{1_{L3L1}}}^2 \right)}{18}} \qquad [A6.37]$$

$$U_{\mathrm{eH}} = \sqrt{\frac{3 \cdot \left(U_{\mathrm{H_{L1}}}^2 + U_{\mathrm{H_{L2}}}^2 + U_{\mathrm{1_{L3}}}^2 \right) + \left(U_{H_{\mathrm{L1L2}}}^2 + U_{\mathrm{H_{L2L3}}}^2 + U_{\mathrm{H_{L3L1}}}^2 \right)}{18}} \qquad [A6.38]$$

Spændingerne U_{e1} og U_{eH} kan kaldes hhv. den ækvivaleret 1. harmoniske spænding og den ækvivaleret forvrænget del af spændingen.

Hermed kan den ækvivalerede tilsyneladende effekt fastsættes:

$$S_{\mathrm{e}} = 3 \cdot U_{\mathrm{e}} \cdot I_{\mathrm{e}} = \sqrt{S_{\mathrm{e1}}^2 + S_{\mathrm{eN}}^2} \qquad [A6.39]$$

Hvor S_{e1} er den ækvivaleret fundamentale tilsyneladende effekt og S_{eN} er den ækvivaleret ikke-fundamentale tilsyneladende effekt. Disse to effekter kan defineres således:

$$S_{\mathrm{e1}} = 3 \cdot U_{\mathrm{e1}} \cdot I_{\mathrm{e1}} \qquad [A6.40]$$

$$S_{\mathrm{eN}} = \sqrt{D_{\mathrm{eI}}^2 + D_{\mathrm{eU}}^2 + S_{\mathrm{eH}}^2} \qquad [A6.41]$$

Hvor

D_{eI} kan kaldes den ækvivaleret harmoniske effekt relateret til strømforvrængning:

$$D_{\mathrm{eI}} = 3 \cdot U_{\mathrm{e1}} \cdot \mathrm{I}_{\mathrm{eH}} \qquad [A6.42]$$

D_{eU} kan kaldes den ækvivaleret harmoniske effekt relateret til spændingsforvrængning:

$$D_{\mathrm{eU}} = 3 \cdot U_{\mathrm{eH}} \cdot I_{\mathrm{e1}} \qquad [A6.43]$$

S_{eH} kan kaldes den ækvivaleret harmoniske tilsyneladende effekt:

$$S_{\mathrm{eH}} = 3 \cdot U_{\mathrm{eH}} \cdot I_{\mathrm{eH}} = \sqrt{P_{\mathrm{H}}^2 + D_{\mathrm{eH}}^2} \qquad [A6.44]$$

[1] 1459-2010 - IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions

Hvor D_{eH} er den ækvivaleret harmoniske effekt relateret til forvrængning. P_{H} skal i dette tilfælde fastsættes således:

$$P_{\mathrm{H}} = \sum_{h \neq 1} \left(\left(U_{\mathrm{h_{L1}}} \cdot I_{\mathrm{h_{L1}}} \cdot \cos \varphi_{\mathrm{h_{L1}}} \right) + \left(U_{\mathrm{h_{L2}}} \cdot I_{\mathrm{h_{L2}}} \cdot \cos \varphi_{\mathrm{h_{L2}}} \right) + \left(U_{\mathrm{h_{L3}}} \cdot I_{\mathrm{h_{L3}}} \cdot \cos \varphi_{\mathrm{h_{L3}}} \right) \right) \quad [A6.45]$$

Er der et indhold af både DC-spænding og DC-strøm, vil der evt. også skulle tages højde for dette ifm. fastsættelsen af P_{H}.

D_{eH} kan omvendt fastsættes således:

$$D_{\mathrm{eH}} = \sqrt{S_{\mathrm{eH}}^2 - P_{\mathrm{H}}^2} \quad [A6.46]$$

Den samlede ikke-aktive effekt N regnes i dette tilfælde som:

$$N = \sqrt{S_{\mathrm{e}}^2 - P^2} \quad [A6.47]$$

Den ækvivaleret THD for hhv. spænding og strøm fastsættes således:

$$THD_{\mathrm{eU}} = \frac{U_{\mathrm{eH}}}{U_{\mathrm{e1}}} \quad [A6.48]$$

$$THD_{\mathrm{eI}} = \frac{I_{\mathrm{eH}}}{I_{\mathrm{e1}}} \quad [A6.49]$$

Effektfaktor kan fastsættes således:

$$PF = \frac{P}{S_{\mathrm{e}}} = \frac{P_1 + P_{\mathrm{H}}}{S_{\mathrm{e}}} \quad [A6.50]$$

Hvor P_1 er samlede mængde af fundamental aktiv effekt fra belastningen/belastningerne.

Faktoren til vurdering af harmonisk forurening angives i dette tilfælde således:

$$HP = \frac{S_{\mathrm{eN}}}{S_{\mathrm{e1}}} \quad [A6.51]$$

To faktorer kræver kendskab til metoden »opløsning i symmetriske komposanter«:

$$PF_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} = \frac{P_1^+}{\sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2}} \quad [A6.52]$$

$$S_{\mathrm{u1}} = \sqrt{S_{\mathrm{e1}}^2 - (S_1^+)^2} \quad [A6.53]$$

Effektfaktoren PF_1^+ kan bruges til at evaluere muligheden for at kompensere den reaktive effekt tilhørende grundfrekvensens positivsekvens (dvs. kompensering af Q_1^+, der kan lede til en effektfaktor $PF_1^+ = 1$). Hermed spiller PF_1^+ samme rolle ifm. fasekompensering, som PF_1 gør det ifm. enfaset effekt.

Faktoren S_{u1} bruges ifm. evaluering af ubalance i systemet, hvor forholdet S_{u1}/S_1^+ giver en relativ vurdering af muligheden for optimering ved at mitigere ubalancen i systemet. Faktoren tager højde for både ubalance i belastningen/belastningerne samt asymmetri i spændingerne.

Da begge ovenstående faktorer gør brug af opløsning i symmetriske komposanter, som ikke gennemgås i dette kapitel, uddybes faktorerne ikke nærmere, og der henvises til standarden IEEE 1459-2010 for yderligere information.

Tabel A6.4 angiver enhederne for de benævnte effekter.

Tabel A6.4 Tabel over enheder for effekter – trefaset effekt.

Benævnelse	Samlet	Fundamental	Ikke-fundamental
Tilsyneladende effekt	S_{e} [VA]	S_{e1}, S_1^+ og S_{u1} [VA]	S_{eN} og S_{eH} [VA]
Aktiv effekt	P [W]	P_1 og P_1^+ [W]	P_H [W]
Ikke-aktiv effekt	N [var]	Q_1^+ [var]	D_{eI}, D_{eU} og D_{eH} [var]