



# Besparingspotential för likströmsdistribution - en förstudie



# Besparingspotential för likströmsdistribution - en förstudie

Torbjörn Thiringer,

Projektteam:

Torbjörn Thiringer

Mohammadamin Bahmani,

Anders Manikoff,

Johan Söderbom,

Mohammad Kharezy,

Hannes Hagmar,

Anders Lindskog



Energimyndighetens projektnummer: 41848-1

E2B2



## Förord

E2B2 Forskning och innovation för energieffektivt byggande och boende är ett program där akademi och näringsliv samverkar för att utveckla ny kunskap, teknik, produkter och tjänster.

I Sverige står bebyggelsen för cirka 35 procent av energianvändningen och det är en samhällsutmaning att åstadkomma verklig energieffektivisering så att vi ska kunna nå våra nationella mål inom klimat och miljö. I E2B2 bidrar vi till energieffektivisering inom byggande och boende på flera sätt. Vi säkerställer långsiktig kompetensförsörjning i form av kunniga människor. Vi bygger ny kunskap i form av nyskapande forskningsprojekt. Vi utvecklar teknik, produkter och tjänster och vi visar att de fungerar i verkligheten.

I programmet samverkar över 200 byggtreprenörer, fastighetsbolag, materialleverantörer, installationsleverantörer, energiföretag, teknikkonsulter, arkitekter etcetera med akademi, institut och andra experter. Tillsammans skapar vi nytta av den kunskap som tas fram i programmet.

*Förstudie av förlustbesparingspotential via användande av högfrekvenstransformator och likspänningsdistribution* är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det har letts av Chalmers och har genomförts i samverkan med Rise och Herrljunga Energi AB.

Projektet ska bidra till att minska energiförluster i slutdistributionen av elenergi till byggnader. Forskarna ska även undersöka hur det går att minska energiförluster vid konvertering av elenergi till användbar form för elapparater. Besparingspotentialen undersöks genom att man använder teknik för att konvertera växelström till likström fram till energianvändningen i byggnader.

Stockholm, 5 december 2017

Anne Grete Hestnes,

Ordförande i E2B2

Professor vid Tekniskt-Naturvetenskapliga Universitet i Trondheim, Norge

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att E2B2 har tagit ställning till innehållet.



## Sammanfattning

Syftet med förstudien var att undersöka om distribution av elenergi i form av likspänning kan löna sig jämfört med konventionell växelströmsdistribution. I rapporten har en övergång från AC (växelspännings/växelströms)-matning till DC (likspännings/likströms)-matning av ett litet distributionsnät till 7 villor studerats. Förluster har beräknats för de två systemen och därefter jämförts. Även ett fall med en kommersiell fastighet finns behandlat i rapporten.

Resultaten visar på fördelar med att ersätta AC-matning med DC-matning där förlustreduceringar på 5–50 % är nåbara. Besparingen blir som störst för byggnader utan direktverkande el för uppvärmning. Övergången till DC-matning leder även till att enklare produkter i byggnaderna kan användas, då likriktarstegen som idag förekommer på nästan alla 'moderna' produkter i byggnader, kan tas bort. Vidare så minskas storleken på den enhet som omvandlar inkommande 10/20 kV till 400 V avsevärt, vilket ihop med de förenklade likriktarstegen leder till en minskad investeringskostnad.

Förstudien har visat på en god potential där nästa steg är att utvidga arbetet med flera studiefall och mer detaljerade modeller av kraftelektronikutrustning.

Nyckelord: likspänning, likspänningsdistribution, förlustreducering, energieffektivisering, verkningsgrad



## Summary

This study examines the impact that a transition from an AC grid to a DC grid has in the case of a small distribution grid with 7 houses connected. The losses for these two systems have then been determined and compared. Also a case with a commercial building is treated.

The study shows significant potential when replacing AC-distribution of energy to buildings by DC, where loss reductions in the range of 5-50 % are reachable. The loss reductions are found to become most significant when the buildings are not directly heated by electricity. It is also worth mentioning that a transition to a DC-supply could remove the need of rectifying stages in most electrical appliances in the buildings. Furthermore, the required amount of material for the transformation of the voltage from 10-20 kV to 400 V would significantly be reduced, which all in all could lead to a reduced investment cost.

The next step is to further expand the work with more study cases as well as more detailed models of power electronic equipment.

Keywords: Direct current, DC-supply, loss reduction, energy efficiency, buildings



## INNEHÅLL

1	INLEDNING	7
1.1	PROBLEMBAKGRUND	7
1.2	SYFTE	7
1.3	TILLVÄGAGÅNGSSÄTT	8
1.4	BETECKNINGSLISTA	8
2	STUDIEFALL	9
2.1	VILLAOMRÅDET	9
2.2	LEDNINGSPARAMETERAR	9
2.3	TIDSSERIER FÖR VILLORNA	10
2.4	DEN KOMMERSIELLA FASTIGHETEN	11
3	FÖRLUSTBERÄKNINGAR FÖR AC OCH DC-SYSTEMET	12
3.1	BERÄKNINGSGÅNG	12
3.2	FÖRLUSTER I DC-LEDNINGAR I EN EXEMPELVILLA	12
3.3	FÖRLUSTER VID OMVANDLING FRÅN AC TILL DC FÖR LASTERNA	13
3.4	FÖRLUSTER I DISTRIBUTIONEN FRÅN 10/20 KV	14
3.5	SLUTSUMMERING	16
4	SLUTSATSER	19
4.1	SLUTSATSER EXEMPELSTUDIEN	19
4.2	FRAMTIDA ARBETE	19
5	REFERENSER	20
	BILAGA: LASTER OCH DERAS VERKNINGSGRADER	21
5.1	LASTER I BYGGNADER MED FOKUS BOSTÄDER	21
5.2	BERÄKNING AV OMVANDLINGSFÖRLUSTER	23
5.2.1	I BYGGNADEN	23
5.2.2	ELNÄTET	25
5.3	LEDNINGAR	26
5.3.1	KABLAGE - UTFORMNING	26
5.3.2	KABLAGE - RESISTANSBERÄKNING	26
5.4	AC- OCH DC-TRANSFORMATORERS VERKNINGSGRAD	27



# 1 Inledning

## 1.1 Problembakgrund

Nästan alla elanvändande produkter drivs på likström. Men eftersom det är växelström som matas fram till eluttagen så har man i stället ett likriktarsteg, antingen som en dosa på produktens elsladd eller inbyggd i produkten. Det här likriktarsteget orsakar elförluster på cirka 3-5 % samt extra materialåtgång. Att undersöka hur man undviker dessa förluster är huvudsyftet med den här förstudien. Några undantag är t.ex. traditionell spis, elektrisk golvvärme och värmeelement i tvättmaskinen, som drivs från ett primärt likströmsled som åstadkoms via ett likriktarsteg direkt där vanliga elsladden går in i apparaten, och detta drar i snitt 3-5 % förluster. Att undvika likriktningen skulle medföra en stor förlustbesparing. Ytterligare drivkrafter till en omställning till likströmsmatning är utvecklingen av solcellsinstallationer och lokala energilager på hushållsnivå där en omvandling till växelspanning är ett onödigt icke-energieffektivt steg. Likaså ser vi nya laster som direkt kan dra nytta av en framtida DC-försörjning, som exempelvis elfordon.

Runt 4 % av energin förloras således i apparatur som använder likspänningsmellanled för att driva sin last om apparaten försörjs via växelspanning. Därmed kan 4 % energiförlust undvikas om apparaturen istället drivs direkt från ett DC-nät. Naturligtvis flyttas endast denna förlust till en central omvandling från AC till DC, men omvandlingen kan då göras energieffektivare och dessutom, när dessa nu är koncentrerade till en plats, användas till något nyttigt, t.ex. för att värma vatten (exempelvis i fjärrvärmesystemet). I systemlösningen tillkommer, givet samma koppararea, så kan distributionsledningen dessutom utnyttjas bättre, d.v.s. även för eldistributionen och resultaterar i en bättre energieffektivitet.

Inom området för likströmsmatning så finns det mycket litteratur tillgänglig. I [1] (se referenslistan) presenteras en studie finansierad av Energimyndigheten där 400 hushålls energiförsörjning studerats som möjliggör att en analys av besparingspotentialen för en DC-fiering av eldistributionen kan genomföras. I [2] redovisas en studie av att försörja en ny kontorsfastighet på 60 000 m<sup>2</sup> där även restauranger och ett hotell ingår. [3-6] visas hur ett DC distributionssystem kan utformas, i [3] presenteras även verkningsgrader för några utvalda laster. I [7] visas på hur ett 48 V DC distributionssystem kan resultera i en LCC-besparing (Livscykelkostnad) jämfört med 230 V. Kvantifieringspotentialen från 10/20 kV AC till lasternas DC-led, har dock författarna inte ännu funnit svaret på i litteraturen. För själva DC/DC-enheten som är tänkt att användas för att ta ner spänningen från 10-20 kV till cirka 300-400 V finns studier gjorda i [8-12] som möjliggör att beräkning på hela elförsörjningskedjan kan genomföras.

## 1.2 Syfte

Arbetet "Förstudie av förlustbesparingspotential via användande av högfrekvenstransformator och likspänningsdistribution" syftar till att använda insamlade data från ett bostadsområde och några olika typer av bostäder för att undersöka om distribution av elenergi i form av likspänning kan löna sig jämfört med växelspanning. Datan som används har samlats in av Rise i samarbete med tidigare projekt. Framförallt så uppstår förluster när man ersätter transformatorn från 10/20 kV till 400 V med en elektronisk enhet som likriktar och transformerar ner spänningen, medan man minskar förlusterna i distributionen av elenergin samt vid slutanvändningen.



### 1.3 Tillvägagångssätt

Först så samlades nödvändig data såsom, ledningslängder, ledningstyper, transformatordata, lastdistributionen samt fördelning av lasttyper in. Därefter vidtogs 4 beräkningssteg. 10/20-0.4 kV transformatorns verkningsgrad bestämdes och en alternativ DC-transformator designades teoretiskt och både AC- samt DC-transformatorns verkningsgrad som funktion av belastning fastställdes. Därefter beräknades ledningsförlusterna i elnätet utanför byggnaderna och även inne i byggnaderna. Slutligen så beräknades den energi som förlorades i själva omvandlingen från växelspanning i apparaterna i huset ut. Sista steget var att sätta samman de olika förlustkomponenterna för att kunna presentera de jämförande resultaten.

### 1.4 Beteckningslista

AC= Alternating Current (växelström) [begreppet används även för spänning]

DC= Direct Current (likström) [begreppet används även för spänning]



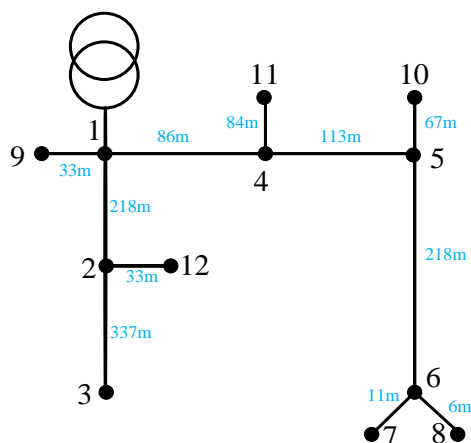


## 2 Studiefall

Som studiefall användes data från ett villaområde i Västra Götaland. Förutom ledningsdata fanns även tillgång till timmedelvärden av elkonsumtionen för villorna. För lastfördelningen i villorna användes resultatet funnet i [1] och för verkningsgraderna användes resultatet från [3]. Ett fall med en kommersiell fastighet, Platinan, undersöktes, och där hämtades ingångsdata från [2].

### 2.1 Villaområdet

Villorna antogs vara uppvärmda med direktverkande el, vilket i dagsläget är något som är på utfasning. Sju villor var anslutna till det undersökta elnätet. Mätdata samlades in vintern 2015. Det var en mild vinter så transformatorn var aldrig nära topplast. Totalt förbrukade villorna 140 MWh, d.v.s. 20 MWh var, vilket ligger mycket nära medelvärdet (18.6 MWh) för eluppvärmda villor enligt [1]. I figur 1 presenteras nätet, med nod-nummer och ledningslängder.



Figur 1. Layout över det undersökta elnätet, Nod 3,7,8,9,10,11,12 är inmatningsnoderna med en villa per position.

Först undersöktes potentialen med endast byggnader uppvärmda med direktverkande el. I nästa beräkningsfall lades fler villor till i området och alla villor antogs därefter vara försörjda med fjärrvärme eller värmepump. På detta sätt så förblev medelförbrukningen i respektive nod i exempelnätet oförändrad.

### 2.2 Ledningsparameterar

I tabell 1 nedan presenteras ledningarnas längd, typ och resulterande resistans i AC respektive DC-fallet.

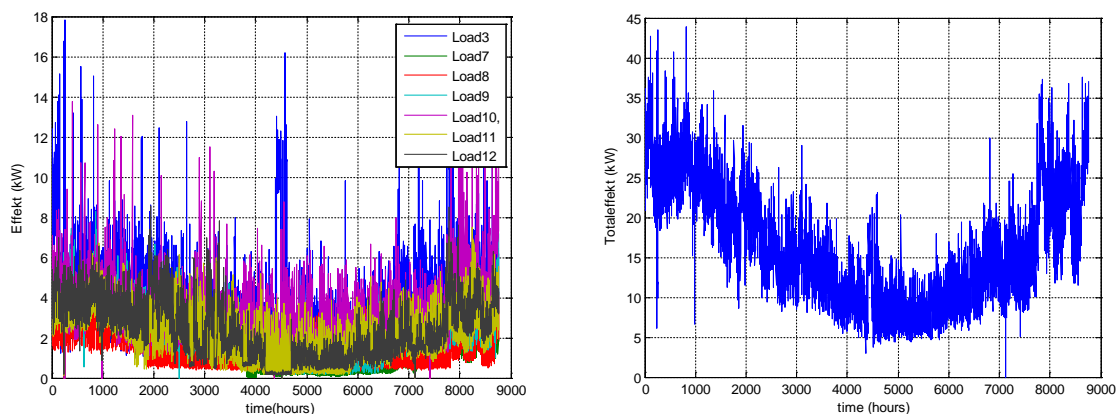


Tabell 1: Ledningar och resulterande resistanser i exempelsystemet.

Från nod	Till nod	Längd [m]	KabelTyp	AC-resistans [mΩ]	DC-resistans [mΩ]
1	2	216	AXK50	138	86
2	3	337	AXK50	216	135
1	4	86	AXK96	27	17
4	5	113	AXK95	36	23
5	6	269	AKKJ50/15	17	108
6	7	11	EKKJ10/10	20	13
6	8	6	EKKJ10/10	11	7
5	10	67	FKKJ16/16	77	54
4	11	84	EXK10	154	96
2	12	63	EXK10	115	72
9	1	33	EXK10	60	38

### 2.3 Tidsserier för villorna

Effektförbrukningen för villorna i systemet togs fram och användes för att beräkna förlusterna i ledningarna mellan transformatorn och byggnaderna. I figur 2 nedan presenteras effekterna i de olika noderna samt totaleffekten in genom transformatorn.



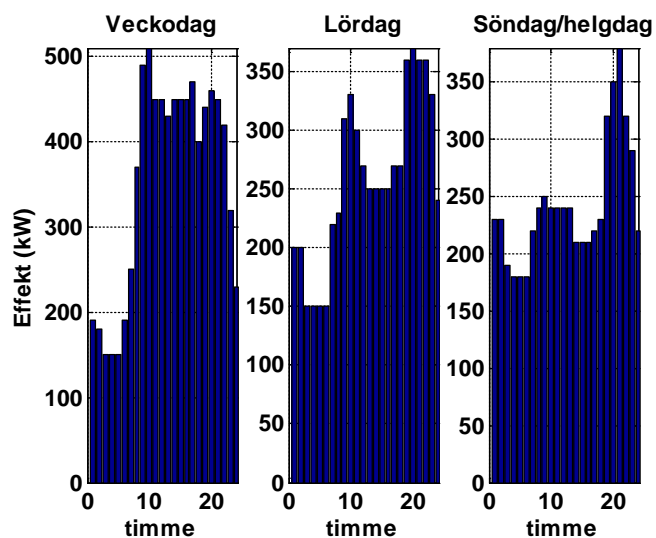
Figur 2. Effekterna i de olika lastnoderna samt sammalagrad effekt.

Som nämntes så var vintern mild då mätdata inhämtades och därmed var belastningen av transformatorn aldrig i närheten av topplast. Ofta väljer nätägaren att installera en lite större transformator, så att man har utrymme för expansion i området utan att behöva byta transformator, även om man tjänar såväl investeringsmässigt som verkningsgradsmässigt på att ha en mindre transformator.



## 2.4 Den kommersiella fastigheten

Den kommersiella fastigheten är baserad på ett beräkningsfall med en planerad byggnad med kontor, restauranger, hotell, m.m. på 60 000 m<sup>2</sup> i Göteborg [2]. Lastfördelningen för dygnets timmar finns presenterade i figur 3. I och med att byggnaden ännu inte är uppförd antogs en fiktiv transformator med 8 % högre märkeffekt än den beräknade toppeffekten, vilket är tämligen konservativt och ger AC-systemet en högre verkningsgrad än vad som förmodligen var fallet. I stort sett alla laster i byggnaden drivs från ett primärt DC-led [2]. Total beräknad förbrukning för den kommersiella byggnaden är 2800 MWh med en medeleffekt på 314 kW.



Figur 3. Lastfördelning, kommersiella fastigheten, återskapat från [2].



## 3 Förlustberäkningar för AC och DC-systemet

### 3.1 Beräkningsgång

För att undvika alltför många beräkningskombinationer delades förlustberäkningarna upp i två delar, en del för byggnaden och en del för elförsörjningen från inkommande 10/20 kV. Bakgrundsdata finns förutom i kapitel 2 även i bilagan. Även typiska lastfördelningar som kan förekomma i villor har inhämtats från litteraturen. Med början vid lasterna beräknas i detta avsnitt förlustkonsekvensen för AC- respektive DC-systemet.

### 3.2 Förluster i DC-ledningar i en exempelvilla

För att beräkna de interna ledningsförlusterna inne i villan användes tabell 2 med data från [3], då [1] inte ger någon vägledning i hur effektförbrukningen fördelar sig över tiden. I och med att förlusterna är kvadratiska mot strömmen, behövs en "tidsbaserad" uträkning genomföras. En kommentar är att vid inköp av t.ex. kyl och frys kan man få mer energieffektiva varianter. Dock är avsikten här att räkna ut en medelförlust i relation till överförd energi, så det påverkar inte resultatet i studien.

Tabell 2. Exempel på elektriska laster i en byggnad, värme exkluderad. (Dygnsenergi)

Typ av last	Effekt [W]	Energiförbrukning [Wh]	Energiförlust AC [Wh]	Energiförlust DC [Wh]
Kyl	150	3 600	2.3	0.8
Frys	150	3 600	2.3	0.8
Micro	800	160	0.3	0.1
TV	156	468	0.6	0.2
DVD spelare	26	26	0	0
Hemmabio	300	300	0.7	0.3
Satellitmottagare	30	720	0.2	0.1
Spelkonsol	190	380	0.6	0.2
Stationär dator	270	540	1.2	0.5
LCD monitor	32	64	0	0
Router	13	312	0	0
Bärbar dator	60	120	0.1	0
Belysning	200	2 400	4	1.5
Tvättmaskin drivmotor	200	400	0.3	0.1
Torktumlare drivmotor	200	200	0.2	0.1
Kaffekokare	1 200	240	0.7	0.3



Vattenkokare	2 000	200	1	0.4
Diskmaskin	1 500	1 500	5.7	2.1
Tvättmaskin	300	600	0.8	0.3
Torktumlare	800	800	2.7	1.0
Spis	2 000	1 000	5.1	1.9
<b>Summa</b>		<b>17 630</b>	<b>29</b>	<b>10</b>

Verkningsgraden för el-överföringen i en villa blir således extremt hög, 0,9994 respektive 0,9984 för DC respektive AC-fallet. Anledningen är dels de korta ledningssträckorna men även att man har en mycket låg strömtäthet i kablar i byggnader, så att man inte riskerar överhettning och därmed risk för brand.

### 3.3 Förluster vid omvandling från AC till DC för lasterna

Förbrukningen varierar mycket mellan olika villor, även om endast villor med direktverkande el tas med i beaktning, från 8 000–48 000 kWh per år [1]. Ett medelvärde som anges i [1] är 18 600 kWh vilket har valts att användas i denna studie. För en lägenhet så var medelförbrukningen 3 710 kWh.

För studien av en typisk villa användes till att börja med 18 600 kWh elenergi varav 78 % förbrukades av AC-laster och resten av DC-laster, dvs produkter med likriktningselektronik enligt uppdelningen som anges i [1]. Detta resulterade i en förlust av 163 kWh för den del av energin som förbrukades av utrustning med likriktningselektronik som kräver ett internt DC-led. En förlust på 4 % antogs för att omvandla växelspanningen till primär dc-ledsspänning som apparaten arbetar ifrån. Vid DC-matning förvinner denna likriktningsförlust, se tabell 3. Verkningsgraden från den sammanlagda frammatade elen jämfört med den mängd som kunde användas av apparaterna blev 98,9 respektive 99,9 %. Inräknat ledningsförlusterna innebär detta en totalförlust i huset på 200 respektive 15 kWh.

Tabell 3: Förluster vid omvandling till användbar DC-energi

	AC	DC
Omvandlingsförluster till primärt dc-led i laster [kWh]	163	0
Summa inkl. ledning i byggnaden [kWh]	200	15
Verkningsgrad [%]	98,93	99,92

Då allt fler produkter och apparater använder sig av interna DC-led, så blir förlustbesparingen allt större vid en övergång till DC-försörjning, vilket presenteras i tabell 4.



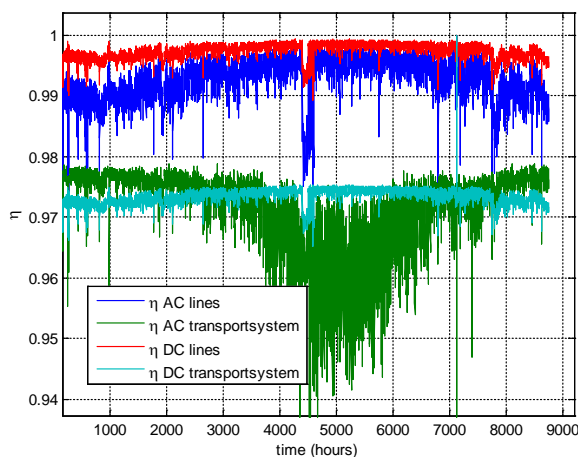
Tabell 4. Omvandlingsförluster för AC respektive DC försörjning, baserat på 18600 kWh förbrukning.

	Villa direkt- verkande el		Fjärr- /bergvärme m. äldre spis		Kontorsfast, Fjärr- /bergvärme m. induktionsspis		Flerbostads hus inkl induktions- spis	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
Omvandlings- förluster till primärt dc-led i laster [kWh]	163	0	557	0	742	0	616	0
Summa inkl. husledning [kWh]	200	15	595	15	781	15	655	15
Verkningsgrad [%]	98,9	99,9	96,9	99,9	96,0	99,9	96,0	99,9

Förlustminskningen är mycket stor när inmatningen byts från AC till DC oberoende av den interna förbrukningen i bostäderna. I och med att exempel nätet för villagruppen drar 140 MWh per år så kommer resultaten i tabell 4 att multipliceras med 7,5 för att få likvärdig effektnivå.

### 3.4 Förluster i distributionen från 10/20 kV

De momentana förlusterna i transformatorn, den elektroniska likriktnings- och transformatornheten samt ledningarna bestämdes utifrån de momentana effekterna. I figur 4 visas momentan verkningsgrad, dels för ledningarna och dels för ledningar och transformator summerat.



Figur 4. Momentan verkningsgrad, för ledningarna respektive för ledningar och transformator summerat.

Resultaten visar att förlusterna i ledningarna sjunker kraftigt vid övergång till DC. Generellt har en DC-transformator högre förluster än en AC-transformator. Speciellt på vintern när transformatorerna är hårt belastade har en AC-transformator bättre verkningsgrad. Det har nyligen kommit ett EU-direktiv som sätter gränsvärden/minimivärden för nya transformatorers verkningsgrader (tyvärr innebär detta en dyrare transformator, och kanske en LCA-mässigt sämre lösning, men det får bli en annan utvärdering). Det betyder att AC-systemet blir mera fördelaktigt i jämförelse med DC-systemet. I tabell 5 presenteras resultaten för det undersökta typfallet.

Tabell 5: Förluster i elförsörjningssystemet utanför villorna.

	AC	DC	AC ny transformator	AC transformator 2021
Transformeringsförluster (10 kV/400 V) [kWh]	2 510	3 369	1705	1442
Ledning i elnätet [kWh]	1 204	429	1204	1204
Servisledning [kWh]	169	65	169	169
Summa [kWh]	3 714	3 798	2901	2646
<b>Verkningsgrad [%]</b>	<b>97,35</b>	<b>97,29</b>	<b>97,93</b>	<b>98,11</b>



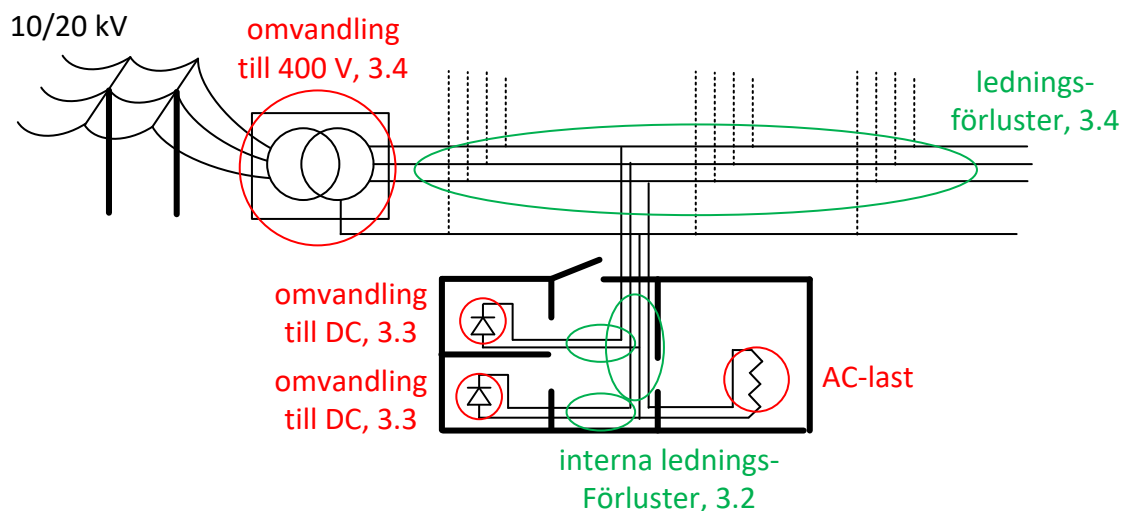
I beräkningsexemplet har en effektfaktor på  $\cos(\varphi) = 1$  använts vilket är så fördelaktigt som det är möjligt för AC-nätet. I händelse av en mer realistisk effektfaktor på  $\cos(\varphi) = 0,9$ , så hade AC-systemets förlust stigit, i tabell 6 presenteras konsekvensen av att ha en effektfaktor  $\cos(\varphi) = 0,9$ .

Förlustsituationen är i stort sätt är identisk för DC och AC-fallet med den existerande transformatorn men med kraven i EU-direktivet blir AC-systemen mer effektiva. Det är inget problem att göra AC-transformatorer effektivare t ex. med mer koppar och järn. Dock ökar priset och det skulle behövas en LCA (livscykelanalys) för att avgöra om EU-direktivet verkligen leder till en miljömässig vinst, speciellt gällande den ökade mängden koppar finns många frågetecken kring t ex. kostnadsökning och resursanvändning, som vore värt att genomföra en studie på.

Resultaten i denna rapport är framtagna med användande av en transformator med data enligt EU-direktivets krav från 2021 och framåt. För den kommersiella fastigheten och även för flerbostadshuset ansågs transformatorn kunna förläggas i direkt anslutning till byggnaden. Besparingspotentialen för ledningarna i det yttre 400 V nätet går därmed förlorade, eftersom det inte finns ett sånt nät, och besparingspotentialen för att gå över till dc-matning minskar.

### 3.5 Slutsummering

I figur 5 finns hela systemet uppritat schematiskt, med avsnittsbeteckningar (bör dock påpekas att 10/20 kV ledningar numera är nergrävda kablar och inte luftledningar som den schematiska bilden visar.)



Figur 5. Schematiskt ursprungligt AC-system.

I tabell 6 finns de totala resulterande förlusterna för hela villasystemet presenterade för ett antal olika fall.





Tabell 6: Förluster i hela elförsörjningssystemet, villaområdet.

	Original				Vid $\cos(\varphi) = 0,9$			
	D-verkande el		Ej D-verkande el		D-verkande el		Ej D-verkande el	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
Utanför huset [kWh]	2646	3798	2646	3798	3000	3798	3000	3798
Inne i huset [kWh]	1500	112	5654	112	1500	112	5654	112
Summa [kWh]	4146	3910	8300	3910	4500	3910	8654	3910
<b>% förlust DC/AC</b>		<b>- 6</b>		<b>- 53</b>		<b>- 13</b>		<b>- 55</b>

I de allra flesta fall reduceras förlusterna vid övergång till likspänning. En osäkerhet i beräkningarna är att det idag inte finns så mycket kända fakta om DC-transformatorn. Hög verkningsgrad kostar och om en billigare enhet används så sjunker verkningsgraden. I tabell 7 presenteras systemverkningsgraden som funktion av DC-transformatorns verkningsgrad. Lägre verkningsgrad än 95 % förefaller inte troligt att den skulle behöva ha. Naturligtvis är det en LCC -beräkning som slutligt kan avgöra vilken verkningsgrad man skall lägga sig på för att få minsta totalkostnad.

Tabell 7: Förluster i hela elförsörjningssystemet för villagruppen, endast dc-laster antaget  $\cos(\varphi) = 1$

Verkningsgrad AC/DC 10 kV AC-> 400 VDC	97,8		97		96		95	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
Utanför huset [Wh]	2646	3798	2646	4640	2646	6044	2646	7448
Inne i huset [Wh]	5654	112	5654	112	5654	112	5654	112
Summa [Wh]	8300	3896	8300	4752	8300	6156	8300	7560
<b>% förlust DC/AC</b>		<b>- 53</b>		<b>- 43</b>		<b>- 26</b>		<b>- 9</b>



I tabell 8 redovisas förlusterna för den kommersiella fastigheten (80 % dc-last har använts samt 97.5 % verkningsgrad för likriktning till primärt dc-led) och flerbostadshuset (66 % DC-last enligt [1] samt 96 % verkningsgrad för likriktning till primärt dc-led). Den kommersiella fastigheten har större laster och därför har en högre verkningsgrad antagits. Även i detta fall kan vi se att det finns en betydande potential för energibesparing trots de ökade förlusterna utanför byggnaden. Om verkningsgraden för den stora likriktarenheten går ner till 97.2 % blir förlusterna lika för AC respektive DC-systemet. För flerbostadshuset är "break-even-punkten" 96.6 % för stora likriktningsenheten.

Tabell 8: Förluster i hela elförsörjningssystemet

	Kommersiella byggnaden		Flerbostadshuset	
	AC	DC	AC	DC
Omvandling från 10 kV AC [kWh]	17.6	60.6	17.6	60.6
Ledningar i huset [kWh]	5.5	2.2	5.5	2.2
Laster [kWh]	55.1	0	72.7	0
Summa [kWh]	78.2	62.8	95.8	62.8
<b>% förlust DC kontra AC</b>		<b>- 20 %</b>		<b>- 34 %</b>



## 4 Slutsatser

### 4.1 Slutsatser exempelstudien

Beräkningarna i föreliggande studie/förstudie visar att förlusterna kan minskas med ca 5–50 % vid övergång från AC-matning till DC-matning. Besparingen blir som störst när byggnader med uppvärmning via fjärrvärme eller bergvärme är anslutna.

En övergång till DC-matning innebär även enklare produkter i byggnaderna eftersom likriktarstegen kan tas bort. Dessutom minskas storleken på transformatorn som omvandlar inkommande 10/20 kV till 400 V. Sammantaget bör detta leda till minskade investeringskostnader vilket dock inte har studerats vidare i denna förstudie.

### 4.2 Framtida arbete

Studien har visat att det finns energimässiga vinster med att ersätta AC-matning med DC-matning. Förslag på framtida forskningsarbete är att:

- fördjupa studierna på omvandlingskomponenternas verkningsgrader
- genomföra en LCA-analys för att även ta den minskade storleken i beaktande när den totala ekonomiska och miljömässiga påverkan skall fastställas.
- undersöka fler exempelfall, såväl med andra elnät som med andra byggnader
- undersöka hur solcellsproduktion gynnas eller missgynnas av en övergång till DC i distributionsnätet
- undersöka hur DC-matning påverkar lastbalansering och lagring. I och med att energilagring förenklas genom att använda DC finns det sålunda en förbättrad möjlighet att kapa effekttoppar vilket ger ett viktigt mervärde för elsystemet. I och med övergången mot ett samhälle med förnyelsebar el kommer vi inte ha problem med själva energimängden som kan produceras. Däremot kommer effekten att vara ett stort problem då det inte blåser eller är sol, och då är möjligheten att kapa effekttoppar väldigt viktig.



## 5 Referenser

- [1] Jean Paul Zimmermann, "End-use metering campaign in 400 households in Sweden – assessment of the potential Electricity Savings, Eneritech, September 2009.
- [2] Martin Behrendt, "Efficiency study: Low voltage DC usage in a commercial building" Master thesis Chalmers University of technology 2016
- [3] Shahin Ahmadi, Mohammad Al-Saidi, Adam Hultgren Hannes Östergren, "Quantifying energy efficiency consequence when performing the end electricity distribution using DC instead of AC" Chalmers University of technology 2016
- [4] Weiss, R.; Ott, L.; Boeke, U., "Energy efficient low-voltage DC-grids for commercial buildings", IEEE First International International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2015
- [5] Fregosi, D.; Ravula, S.; Brhlik, D.; Saussele, J.; Frank, S.; Bonnema, E.; Scheib, J.; Wilson, E. , "A comparative study of DC and AC microgrids in commercial buildings across different climates and operating profiles", IEEE First International International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2015
- [6] Boeke, U.; Wendt, M., "DC power grids for buildings", IEEE First International International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2015
- [7] Mohammad Amin, Yasir Arafat, Stefan Lundberg, Stephan Mangold, "An efficient appliance for low voltage DC house", 2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2011; Winnipeg, MB; 3 October 2011 through 5 October 2011 p. 334-339 . (2011)
- [8] Bahmani, M.A.; Thiringer, T.; Rabiei, A.; Abdulahovic, T., "Comparative Study of a Multi-MW High Power Density DC Transformer with an Optimized High Frequency Magnetics in All-DC Offshore Wind Farm," IEEE Transactions on Power Delivery, 2015
- [9] Jimichi, T., Kaymak, M., De Doncker, R., "Comparison of Single-phase and Three-Phase Dual-Active Bridge DC-Dc Converters with Various Semiconductors Devices for Offshore Wind Turbines," 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC 2017 - ECCE Asia)
- [10] Shenghui Cui; Nils Soltau; Rik W. De Doncker" A High Step-up Ratio Soft-Switching DC-DC Converter for Interconnection of MVDC and HVDC Grids" IEEE Transactions on Power Electronics, 2017
- [11] Siddique et al., "Comparison of Modular Multilevel and Neutral\_Point-Clamped Converters for medium\_Voltage Grid-Connected Applications," 5<sup>th</sup> international conference on Renewable Energy Research and Applications, 20-23 Nov 2016, Birmingham, UK
- [12] Alinaghi Marzoughi; Rolando Burgos; Dushan Boroyevich; Yaosuo Xue", Investigation and comparison of cascaded H-bridge and modular multilevel converter topologies for medium-voltage drive application" IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society



## Bilaga: Laster och deras verkningsgrader

### 5.1 Laster i byggnader med fokus bostäder

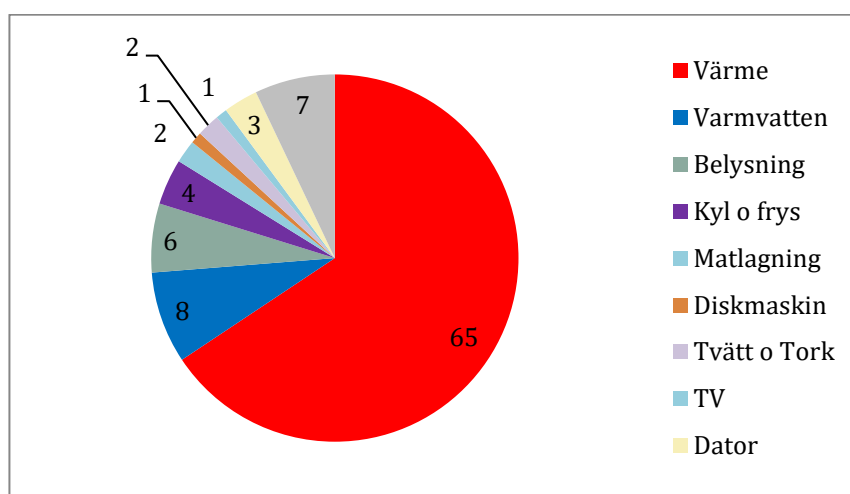
I en byggnad finns det ett stort antal laster som förbrukar el. I tabell 9 nedan visas några exempel på typiska laster i en bostad, samt deras effekt och ungefärliga tidsanvändning. Vidare presenteras om lasterna arbetar direkt från en intern DC-nivå, eller om de kan använda en inkommande AC-spänning utan omvandling.

Tabell 9. Exempel på elektriska laster i en byggnad [3]

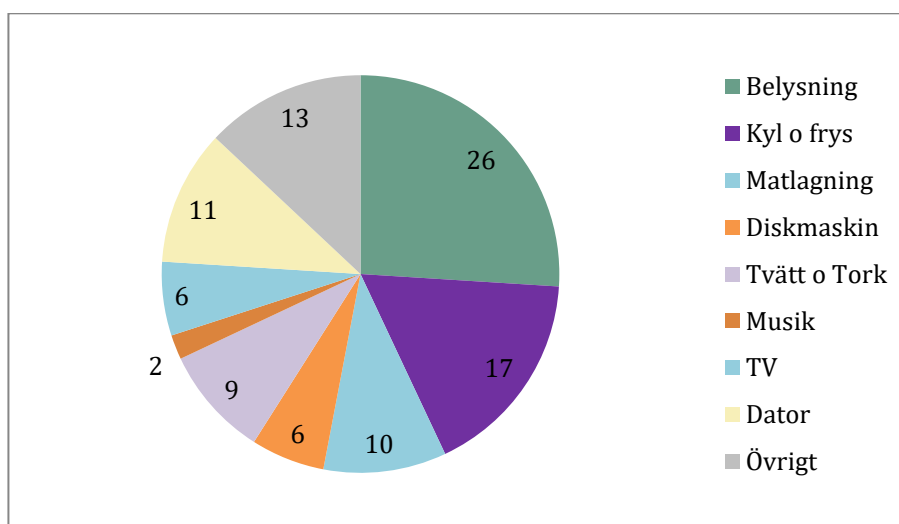
Typ av last	Effekt [W]	Tid [h/dygn]	Kabel-längd [m]	Kabelarea [mm <sup>2</sup> ]	AC/DC
Kyl	150	24	10	1.5	DC
Frys	150	24	10	1.5	DC
Micro	800	0.2	10	2.5	DC
TV	156	3	20	1.5	DC
DVD spelare	26	1	20	1.5	DC
Hemmabiosystem	300	1	20	1.5	DC
Satellitmottagare	30	24	20	1.5	DC
Spelkonsol	190	2	20	1.5	DC
Stationär dator	270	2	20	1.5	DC
LCD monitor	32	2	20	1.5	DC
Router	13	24	20	1.5	DC
Bärbar dator	60	2	20	1.5	DC
Belysning	200	12	20	1.5	DC
Tvättmaskin (drivmotor)	200	2	10	1.5	DC
Torktumlare drivmotor	200	1	10	1.5	DC
Kaffekokare	1 200	0.2	10	2.5	AC
Vattenkokare	2 000	0.1	10	2.5	AC
Diskmaskin	1 500	1	10	2.5	AC
Tvättmaskin	300	2	10	1.5	AC
Torktumlare	800	1	10	1.5	AC
Spis	2 000	0.5	10	2.5	AC



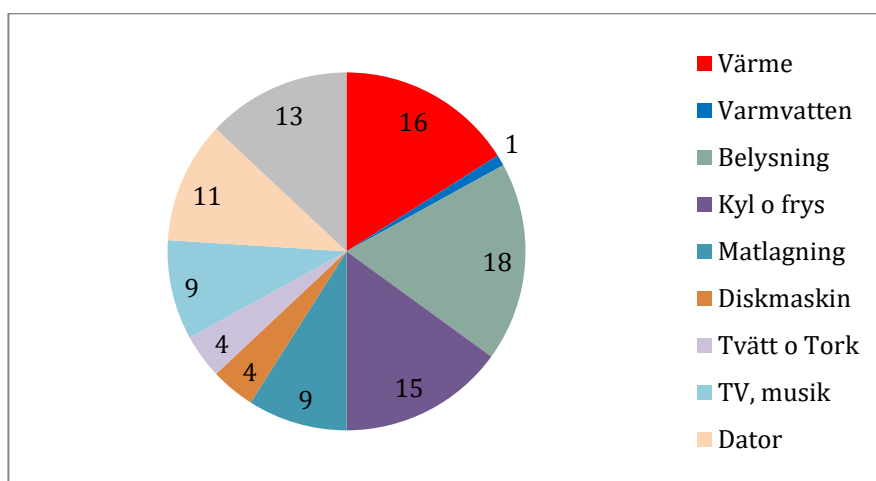
Ett stort problem är att det finns ofantligt många varianter på elektriska laster i byggnader. I [1] finns dock en sammanställning på hur elenergiförbrukningen såg ut i snitt för såväl en eluppvärmd villa som lägenhet, baserad på en studie av 400 hushåll, vilket har använts i förstudien. Här har fallet med direktverkande el använts och därmed dominerar uppvärmningen i elförbrukningen. I figur 6 finns de olika förbrukningarna presenterade. I figur 7 är värmelasterna borttagna och i figur 8 finns lastfördelningen för en lägenhet.



Figur 6. Fördelning av lasternas konsumtion i en typvilla [1].



Figur 7. Fördelning av lasternas konsumtion i en typvilla, exklusive värme i varmvatten [1]



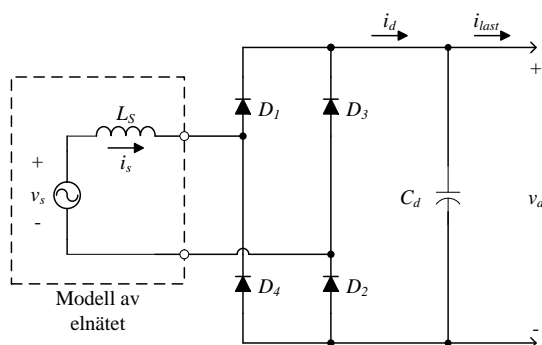
Figur 8. Fördelning av lasternas konsumtion i en lägenhet [1]

## 5.2 Beräkning av omvandlingsförluster

### 5.2.1 I byggnaden

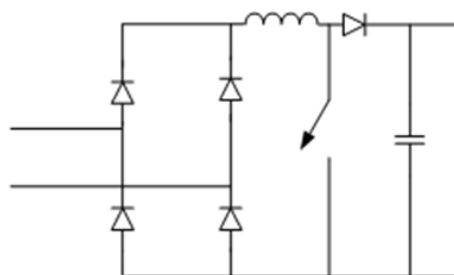
Värmelaster, d.v.s. direktverkande el, kaffekokare, äldre spisar, elektrisk golvvärme, äldre tvätt- och diskmaskiner samt hårtorkar, drivs utmärkt direkt med traditionell växelspanning. Övriga laster drivs i dagsläget från ett likspänningsled som bildas ifrån inkommande växelspanning. Induktionsspisar och värmepumpar drivs också från ett likspänningsled och i en modern tvätt- och diskmaskin så drivs även själva motorerna från likspänning, medan värmelement drivs direkt från växelspanningen. Växelspanningslasterna kan lika gärna drivas från likspänning, men det ger ingen vinst jämfört med att driva från växelspanning.

Omvandling till likspänning sker via en kraftelektronisk krets. För mindre effekter kan en enklare krets användas, se figur 9. Observera att detta är likriktningen till första likledsnivån, därefter förekommer ofta ytterligare en krets som transformerar ner till en lägre DC-nivå. Då denna andra transformering är identisk i de båda fallen har denna utelämnats i studien och ansetts vara en integrerad del av produkten.



Figur 9. Omvandling till likspänning för lägre effekter.

För lite högre effekter används ofta en lite mera elnätsvänlig krets, som finns presenterad i figur 10.



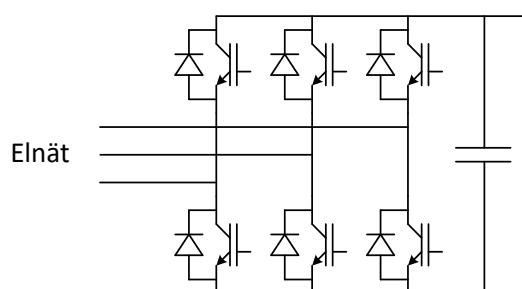
Figur 10. Omvandling till likspänning för medeleffekter 75-3 300 W.

För de lägre effekterna så är verkningsgraden 91 % vid omvandling från växelspänning till den sekundära likspänningen medan för de mellanhöga effekterna är den 95 % [2]. Dessa kretsar bildar en preliminär likspänningsnivå på cirka 380 V DC, vilket föranleder valet av 380 V DC som spänningsförsörjningsnivå. Som nämndes ovan, så behövs vanligtvis ytterligare en omvandlare som tar ner likspänningen till en lägre nivå som produkten använder. Denna är dock gemensam för såväl AC som DC-systemet och behöver därför ej beaktas i denna studie.

Det kan finnas ytterligare vinster att göra genom att använda en lägre DC-spänningsnivå för eldistributionen, men detta ligger inte inom omfattningen för förstudien.

För de allra högsta effekterna kan man även använda en trefas transistorbrygga och likrikta från alla tre faserna samtidigt, se figur 11.



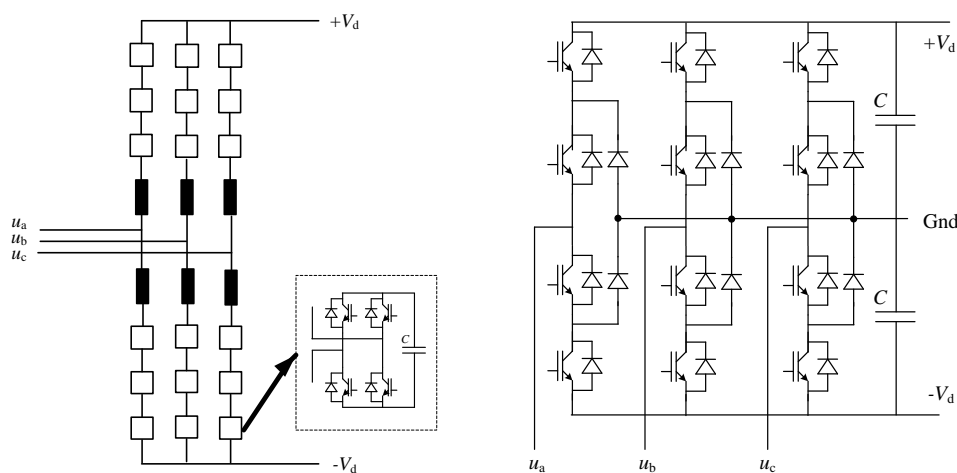


Figur 11. Omvandling till likspänning för högre effekter.

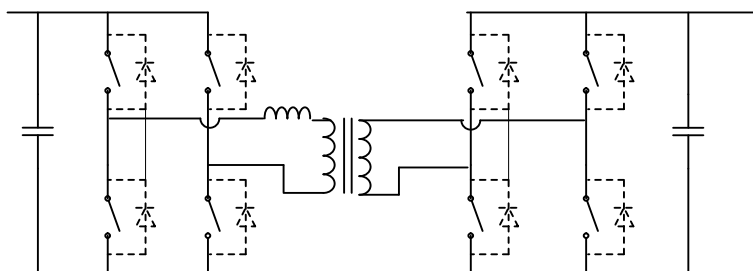
### 5.2.2 Elnätet

Transistorbryggan i figur 11 kan användas för att likrikta elnätets spänning till en första likspänningsnivå. Dock erhålles bättre verkningsgrader om det så kallade MMC systemet eller en så kallad NPC omriktare användas (MMC=Multi Modular Converter, NPC=Neutral Point Clamped). I [4,5] finns exempel på dessa likriktarkretsar presenterade. För effektnivåer för 100-tals kW och MW kan en MMC-omriktare eller en NPC-omriktare nå 99,5 respektive 99,2 % verkningsgrad [11,12]. I detta arbete har siffran 99,2 % verkningsgrad använts. Dessa omriktartyper finns presenterade i figur 12.

Från den primära likspänningsnivån som t.o.m. kommer att bli högre än den inkommande AC-spänningens nivå, så behöver en omvandling till lägre spänning ske, precis som för lasterna i byggnaderna. En lämplig krets för detta är den så kallade fullbryggan styrd med DAB-principen [8,9]. I figur 13 presenteras denna krets. Verkningsgraden vid denna omvandling kan nå 98,5 % eller högre [8–10]. Sammantaget har således 97,8 % verkningsgrad antagits vid likriktning från 10 kVAC till +380 VDC.



Figur 12. Omvandling till likspänning från trefas, trefas + NPC omriktare



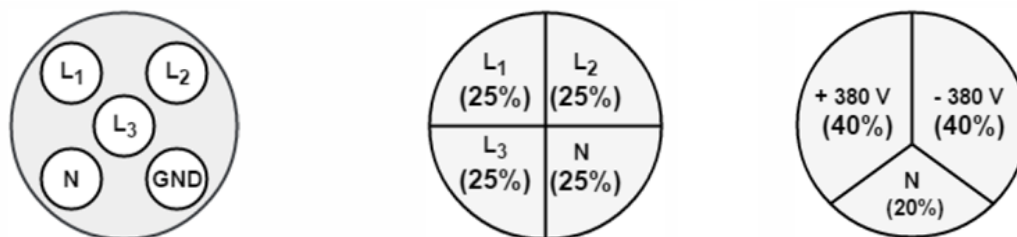
Figur 13. Krets för omvandling mellan likströmsnivåer.

### 5.3 Ledningar

#### 5.3.1 Kablage – utformning

Större mängder eleffekt transporteras typiskt i ett AC-kablage med 400 V huvudspänning, där spänningen mellan respektive fas och neutral är 230 V.

I ett trefaskablage för stora strömmar, typiskt mellan transformatorstationen och byggnaderna så ryms följande ledare, se figur 14. Till vänster en så kallad serviskabel som används just närmast huset och till höger kabeln som leder strömmen från transformatorstationen till elskåpet i närheten av huset. I figur 14, till höger syns en tänkt dc-kabel



Figur 14. Ledare trefaskablage, vänster samt mitten, och till höger en tänkt utformning av DC kabel

Spänningsnivån som allmänt anses vara lämplig för DC-försörjning är 380 V. Även om större laster kan försörjas med trefas inne i byggnaden så sker elförsörjningen i allmänhet via enfas-kablage med en ledararea på 1.5 och 2.5 mm<sup>2</sup> avsedda för 6 & 10 A säkring.

#### 5.3.2 Kablage – resistansberäkning

Resistansen ( $R$ ) i en kabel beräknas enligt

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [\Omega]$$



där  $\rho$  motsvarar materialets resistivitet,  $l$  längden på kabeln och  $A$  tvärsnittsarean på kabeln. För koppar och aluminium gäller

$$\rho = 0.0168 \mu\Omega/m \quad \rho = 0.0282 \mu\Omega/m$$

Eftersom det endast krävs två ledare så blir ledarnas individuella area större vid DC-matning, i storleksordningen 60 %. Effektförlusten i en AC-kabeln ( $P_{AC}(t)$ ) och DC-kabeln beräknas därefter enligt

$$P_{AC}(t) = 3Ri(t)^2 \quad \text{och} \quad P_{DC}(t) = 2Ri(t)^2$$

#### 5.4 AC- och DC-transformatorers verkningsgrad

Distributionstransformatorn som transformerar spänningen från inkommande 10/20 kV till 400 V hade i exempelfallet data enligt tabell 10.

Tabell 10: Specifikation av transformatorn för villasystemet

Transformatoromsättning		Typ	Märkeffekt	Förluster	
Hsp-sida	Lsp-sida		[kVA]	Vid tomgång	Vid märkeffekt
[V]	[V]			[W]	[W]
10 500	400	Dyn11	100	250	1 430

Sålunda är tomgångsförlusten kontinuerligt 250 W medan belastningsförlusten stiger kvadratisk från 0 till 1180 W. Utifrån detta kunde resistansen i transformatorn beräknas och förlusten i transformatorn blev

$$R_{transformator} = \frac{P_{bel}}{3I^2} = 18.9 m\Omega$$

och därmed blir totalförlusten i transformatorn

$$P_{transformator}(t) = P_0 + 3R_{transformator}i(t)^2$$

Dock användes i huvudsak i beräkningarna i rapporten transformatorer som uppfyller EU-direktivet [EU548/2014] för nyinstallerade transformatorer för år 2021 och framåt.



*Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.*

*E2B2 genomförs i samverkan mellan IQ Samhällsbyggnad och Energimyndigheten åren 2013–2017. Läs mer på [www.E2B2.se](http://www.E2B2.se).*

