

CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Utveckling av ett Excelbaserat dimensioneringsverktyg för mellanspänningsdrivsystem

Ett strukturerat tillvägagångssätt för val av omriktare och specifikation av transformatorer i tidiga projekteringsskeden

Författare: Mohammad Ahmed & Abdullah Abbas
Handledare: Thomas Hammarström
Examinator: Thomas Hammarström
Industriell samarbetspartner: Innomotics AB

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen i elektroteknik
Institutionen för elektroteknik,
Chalmers Tekniska Högskola

Utveckling av ett Excelbaserat dimensioneringsverktyg för mellanspänningsdrivsystem **1**
Förord **3**
Abstract **4**
Sammanfattning **5**
1. Inledning **7**
1.1 Bakgrund 7
1.2 Syfte 8
1.3 Avgränsningar 8
1.4 Precisering av frågeställningen 9
2. Teknisk bakgrund **10**
2.1 Mellanspänningsomriktare i industriella drivsystem 10
2.1.1 Funktion och användningsområden 10
2.1.2 Uppbyggnad och tekniska egenskaper 11
2.1.3 Front-end-topologier: DFE och AFE 11
2.1.4 Systemaspekter vid dimensionering 12
2.2 Effekt, ström och grundläggande dimensionering 13
2.3 Frekvensberoende drift och momentkarakteristik 15
2.4 Derating och driftförhållanden 18
2.5 Transformatorer i MV-drivsystem 21
2.6 Kortslutningsnivå och nätpåverkan 24
3. Metod **28**
3.1 Övergripande arbetsmetod 28
3.2 Kravinsamling och analys av dimensioneringsbehov 28
3.3 Verktygets övergripande struktur 29
3.4 Modellering av omriktarberäkning 30
3.5 Modellering av transformatorberäkning 30
3.6 Standardtransformator eller specialtransformator 30
3.7 Implementering av förfrågningsunderlag för transformator 31
3.8 Verifiering och rimlighetskontroll 31
3.9 Metodens begränsningar 32
4. Resultat och systembeskrivning **33**
4.1 Översikt av det utvecklade verktyget 33
4.2 Indata och användargränssnitt 33
4.3 Databaser och teknisk information 36
4.4 Urval och kontroll av omriktare 36
4.5 Frekvensberoende drift och DRIVE_CURVES 37
4.6 Transformatorberäkning och teknisk förfrågningsunderlag 39
4.7 Klassificering av standard- och specialtransformatorer 39
4.8 Resultatpresentation och statusmeddelanden 41
4.9 Funktionella resultat och teknisk nytta 43
4.10 Begränsningar i resultatet 43
5. Diskussion **44**
5.1 Metodens lämplighet och genomförande 44
5.2 Modellering, förenklingar och tekniska antaganden 44

5.3 Omriktarval och teknisk realitet 45
5.4 Transformatorns roll och praktisk användbarhet 46
5.5 Excel som plattform 47
5.6 Validering och tillförlitlighet 47
5.7 Hållbarhet, resursanvändning och ingenjörsansvar 48
5.8 Fortsatt utveckling 49
6. Slutsatser **50**
7. Referenser **52**

Förord

Detta examensarbete har genomförts inom högskoleingenjörsprogrammet i elektroteknik vid Chalmers tekniska högskola i samarbete med Innomotics AB. Arbetet omfattar 15 högskolepoäng och har fokuserat på utvecklingen av ett Excel-baserat dimensioneringsverktyg för mellanspänningsdrivsystem.

Arbetet har gett oss möjlighet att tillämpa kunskaper från utbildningen på ett verkligt industriellt problem. Genom projektet har vi fått en djupare förståelse för hur tekniska beräkningar, produktdata och praktiska ingenjörsbedömningar kan kombineras i ett verktyg som stödjer tidiga projekt- och offertskeden. Det har även gett oss en större insikt i hur dimensionering av mellanspänningsomriktare och tillhörande transformatorlösningar hanteras i industriella sammanhang.

Vi vill rikta ett stort tack till Innomotics AB för möjligheten att genomföra arbetet i nära koppling till ett konkret industriellt behov. Ett särskilt tack riktas till Thorsten Hinrichs och Joachim Rydberg på Innomotics AB för deras tekniska vägledning, värdefulla synpunkter och stöd under arbetets gång.

Vi vill även tacka vår handledare och examinator Thomas Hammarström vid Chalmers tekniska högskola för stöd, återkoppling och vägledning under projektets genomförande. Hans synpunkter har hjälpt oss att strukturera arbetet och utveckla rapporten i rätt riktning. Slutligen vill vi tacka alla som på olika sätt har stöttat oss under arbetets gång.

Abstract

Industrial medium voltage (MV) drive systems are becoming increasingly complex, which creates a need for clear and reliable methods during the early stages of dimensioning. In many engineering projects, the selection of converters and related equipment, such as transformers, is often based on information from different technical documents together with previous experience. This can make the process time-consuming and may lead to variations in how decisions are made.

This thesis focuses on the development of an Excel-based dimensioning tool that supports the selection of medium voltage converters and helps define suitable transformer solutions. The tool is intended for use during early project and tender phases, where decisions often need to be made within a limited time while still maintaining a sufficient technical basis. It combines electrical calculations, product data, derating factors, and operating characteristics related to frequency into one structured workflow.

An important part of the work is the inclusion of transformer specification as part of the converter selection process. Based on the system requirements entered by the user, the tool produces a structured transformer inquiry data sheet and indicates whether a standard transformer solution is suitable or if a custom-built transformer is required. In this way, the tool connects the dimensioning process more directly to practical engineering decisions.

Microsoft Excel was chosen as the platform because it is widely available, familiar to many engineers, and allows the calculations and assumptions to remain transparent. Although Excel has limitations compared with more advanced simulation or design software, it provides a practical balance between functionality and usability for early-stage engineering work.

The results show that a structured dimensioning tool can make the selection process more consistent and reduce dependence on individual experience. The tool can also support faster and more organized decision making in project and tender work. However, it should be seen as a preliminary engineering support tool and not as a replacement for detailed design, final verification, or project-specific technical review.

Sammanfattning

Industriella mellanspänningsdrivsystem blir allt mer komplexa, vilket skapar ett behov av tydliga och tillförlitliga metoder för dimensionering i tidiga projektfaser. I många projekt baseras valet av omriktare och tillhörande utrustning, såsom transformatorer, ofta på information från olika tekniska dokument tillsammans med tidigare erfarenhet. Detta kan göra processen tidskrävande och leda till variationer i hur beslut fattas.

Detta examensarbete fokuserar på utvecklingen av ett Excel-baserat dimensioneringsverktyg som stödjer val av mellanspänningsomriktare och hjälper till att definiera lämpliga transformatorlösningar. Verktyget är avsett att användas i tidiga projekt- och offertskeden, där beslut ofta behöver fattas inom begränsad tid men ändå baseras på ett tillräckligt tekniskt underlag. Genom att kombinera elektriska beräkningar, produktdata, derating-faktorer och frekvensberoende driftförhållanden samlas dimensioneringsprocessen i ett strukturerat arbetsflöde.

En viktig del av arbetet är att transformatorns specifikation inkluderas som en del av valet av omriktare. Utifrån de systemkrav som användaren anger kan verktyget generera ett strukturerat transformer inquiry data sheet och indikera om en standardtransformator är lämplig eller om en kundanpassad transformator krävs. På så sätt kopplas den tekniska dimensioneringen tydligare till praktiska ingenjörsbeslut i projekt- och offertarbete.

Microsoft Excel valdes som plattform eftersom det är lättillgängligt, välkänt för många ingenjörer och gör beräkningar och antaganden transparenta. Även om Excel har begränsningar jämfört med mer avancerade simulerings- och designverktyg ger det en praktisk balans mellan funktionalitet och användbarhet i tidiga skeden.

Resultatet visar att ett strukturerat dimensioneringsverktyg kan göra urvalsprocessen mer enhetlig och minska beroendet av enskilda personers erfarenhet. Verktyget kan även bidra till snabbare och mer organiserat beslutsfattande i projekt- och offertarbete. Samtidigt bör det ses som ett stöd för preliminära tekniska analyser och inte som en ersättning för detaljerad projektering, slutlig verifiering eller projektspecifik teknisk granskning.

1. Inledning

1.1 Bakgrund

I moderna industriella anläggningar används elektriska drivsystem i allt större utsträckning för att uppnå reglerbar drift, hög energieffektivitet och god anpassning till processens krav. När effektnivåerna blir höga och lasten ställer krav på kontinuerlig, robust och flexibel drift är mellanspänningsomriktare ofta ett naturligt val [1][2]. Sådana system förekommer i bland annat pumpapplikationer, fläktsystem, kompressorer, provbäddar och andra industriella drivfall där direkt nätanslutning inte ger tillräcklig funktionalitet eller leder till ett mindre optimalt utnyttjande av både elnät och mekaniskt system [2][3]. I dessa sammanhang är det inte tillräckligt att enbart välja en omriktare utifrån nominell effekt. I stället måste dimensioneringen förstås som ett systemtekniskt problem där omriktare, transformator, inmatningsenhet, kabelsystem och ibland även ställverksutrustning samverkar och påverkar lösningens tekniska lämplighet.

Detta examensarbete har genomförts i samarbete med Innomotics AB och utgår från ett konkret industriellt behov. Företaget har identifierat att dimensioneringen av mellanspänningsomriktare och tillhörande utrustning i dag i stor utsträckning bygger på information som är spridd över flera olika dokument, såsom produktkataloger, manualer, FAQ-underlag och interna erfarenhetsbaserade rutiner. I den projektbeskrivning som ligger till grund för arbetet anges att målet är att utveckla ett Excel-baserat verktyg som ska underlätta för säljare och ingenjörer att välja lämplig omriktarlösning samt sammanställa underlag för transformator, switchgear och kabelberäkningar. Av samma beskrivning framgår också att verktyget ska fokusera på två omriktarvarianter, med och utan inbyggd transformator, och att lösningen bör vara enkel att underhålla och vidareutveckla.

Ur ett tekniskt perspektiv innebär detta att arbetet rör mer än en ren automatisering av befintliga handberäkningar [2][3]. Den egentliga utmaningen ligger i att strukturera en komplex beslutsprocess så att den blir mer konsekvent, spårbar och användbar i ett tidigt projektskede. Ett sådant verktyg måste kunna hantera flera typer av indata samtidigt, exempelvis nätspänning, kortslutningsnivå, frekvens, motorlast, effektfaktor, verkningsgrad, installationsförhållanden, designmarginaler samt omriktarspecifika begränsningar. Det behöver också kunna översätta resultatet av dessa indata till ett tekniskt meningsfullt förslag, där det framgår om en vald lösning ryms inom befintliga standardkomponenter eller om den kräver en särskilt framtagen transformatorlösning.

Transformatorn utgör i detta sammanhang en särskilt viktig del av systemet. Den fungerar inte enbart som en passiv gränsyta mellan nät och omriktare, utan måste dimensioneras utifrån nätkrav, spänningsnivåer, strömnivåer, kylmetod, kopplingsgrupp, frekvens och vald front-end-princip. Inom ramen för projektet har det blivit tydligt att ett användbart dimensioneringsverktyg därför måste kunna generera ett inquiry data sheet för transformatorn, där sådana parametrar sammanställs på ett sätt som gör dem användbara i

kontakt med leverantör eller tillverkare. I praktiken innebär detta att verktyget inte enbart ska tala om att en transformator behövs, utan också specificera vilken typ av transformator som efterfrågas och om en standardlösning är möjlig eller inte.

Valet av Excel som plattform är i detta avseende avsiktligt och motiverat av praktiska skäl. Ett kalkylbladsbaserat verktyg är lättillgängligt, relativt enkelt att sprida inom en organisation och ger samtidigt hög transparens i beräkningar och antaganden. Detta är särskilt värdefullt i ett tidigt projekt- eller offertskede, där lösningar måste kunna bedömas snabbt men ändå vara tekniskt förankrade. Samtidigt ställer detta höga krav på verktygets struktur. Om indata, databaser, beräkningar och resultat inte hålls tydligt åtskilda riskerar verktyget att bli svårt att granska, underhålla och vidareutveckla. Arbetet handlar därför inte bara om att beräkna rätt storheter, utan också om att skapa en tekniskt stringent och användarvänlig struktur för hur dimensioneringskunskap ska organiseras.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att utveckla ett Excel-baserat dimensioneringsverktyg för mellanspänningsomriktare och tillhörande transformatorlösningar i industriella drivsystem. Verktyget ska användas som ett tekniskt beslutsstöd i tidiga projekt- och offertskeden och ska, baserat på givna nät-, motor- och installationsdata, kunna bidra till ett mer systematiskt val av lämplig omriktare samt generera relevanta underlag för transformator, kabel och annan kringutrustning.

Syftet är vidare att skapa en metodisk struktur för hur spridd teknisk information kan samlas, tolkas och omsättas i ett praktiskt användbart verktyg. Detta innebär att verktyget inte enbart ska utföra grundläggande beräkningar, utan även tydliggöra vilka parametrar som styr dimensioneringen, hur olika tekniska begränsningar påverkar urvalet och när ett givet behov kan täckas av standardkomponenter respektive när specialanpassning krävs. Särskilt centralt är att verktyget ska kunna generera ett förfrågningsunderlag för transformatorer, så att resultaten kan användas vidare i dialog med tillverkare eller leverantör.

Mot denna bakgrund har examensarbetet ett dubbelt syfte. Dels handlar det om att utveckla ett konkret tekniskt hjälpmedel med tydlig industriell nytta, dels om att analysera och strukturera själva dimensioneringsprocessen på ett sådant sätt att den blir spårbar, reproducerbar och möjlig att vidareutveckla.

1.3 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till preliminär och ingenjörsmässig dimensionering under projektets inledande fas. Verktyget är därmed inte avsett att ersätta fullständig detaljprojektering, tillverkarens slutliga konfigurering eller verifiering mot samtliga tillämpliga standarder. Fokus ligger istället på att skapa ett robust och användbart beslutsstöd som kan bidra till att rätt teknisk riktning väljs i ett tidigt skede.

Detta innebär att flera typer av analyser lämnas utanför arbetets omedelbara omfattning. Arbetet omfattar inte fullständig elektromagnetisk simulering, detaljerad harmonikanalys, skyddsinställningar, termisk livslängdsanalys eller mekanisk detaljkonstruktion av transformatorer och ställverksutrustning. Kabeldimensioneringen behandlas i huvudsak som en preliminär kontrollfunktion, där centrala parametrar såsom längd, material, förläggningssätt och spänningsnivå används för att skapa ett tidigt underlag, men inte som en slutlig projekteringsberäkning för installation.

En ytterligare avgränsning gäller verktygets produktmässiga omfattning. Verktyget utvecklas utifrån de omriktartyper, transformatorparametrar och tekniska beslutsprinciper som framkommit inom ramen för samarbetet med Innomotics. Det gör inte anspråk på att vara ett generellt dimensioneringssystem för alla förekommande MV-drivsystem på marknaden. Vidare omfattar arbetet inte fullt integrerad koppling till externa konfigurationsverktyg för produktnummer, kommersiella offertsystem eller automatiserad prisberäkning, även om sådana funktioner identifierats som relevanta för fortsatt utveckling.

Slutligen avgränsas arbetet även metodiskt. Verktyget utformas i Excel för att säkerställa tillgänglighet, transparens och praktisk användbarhet. Det innebär att lösningen medvetet utformas som ett kalkylbladsbaserat beslutsstöd snarare än som ett fristående programvarusystem. Denna avgränsning är inte bara praktisk utan också strategisk, eftersom målet är att skapa ett verktyg som kan tas i bruk och granskas i den miljö där behovet uppstått.[4]

1.4 Precisering av frågeställningen

Utifrån arbetets syfte preciseras examensarbetet genom följande frågeställningar:

- Hur kan ett Excel-baserat verktyg utformas för att på ett strukturerat och ingenjörsmässigt sätt stödja dimensionering av mellanspänningsomriktare i industriella applikationer?
- Vilka indata är mest avgörande för ett användbart tekniskt beslutsstöd, och hur bör dessa definieras för att minska risken för feltolkning och inkonsekvent användning?
- Hur kan omriktarens nominella data kompletteras med frekvensberoende ström- och effektkurvor samt deratingprinciper, så att urvalet bättre motsvarar verkliga driftförhållanden?
- Hur bör logiken byggas upp för att ett verktyg ska kunna gå från nät- och motordata till ett rimligt omriktarval, och vidare till ett tekniskt relevant transformatorunderlag?
- Hur kan verktyget avgöra om en transformatorlösning motsvarar en definierad standardtransformator eller om ett fullständigt inquiry data sheet behöver genereras för en specialbyggd transformator?
- Hur lämplig är Excel som plattform för denna typ av tekniskt beslutsstöd, givet krav på transparens, användarvänlighet, spårbarhet och vidareutvecklingsbarhet?

Genom dessa frågor avgränsas inte bara vad arbetet ska behandla, utan också hur resultatet senare ska värderas. Ett viktigt kriterium är att verktyget inte bara ska vara matematiskt fungerande, utan också tekniskt begripligt och praktiskt användbart för den tänkta användaren.

2. Teknisk bakgrund

2.1 Mellanspänningsomriktare i industriella drivsystem

2.1.1 Funktion och användningsområden

Mellanspänningsomriktare, ofta benämnda MV-drives, används i industriella applikationer där effekt- och spänningsnivåerna är så höga att lågspänningslösningar inte längre är tekniskt, ekonomiskt eller praktiskt lämpliga. I mindre drivsystem kan lågspänningsomriktare ofta användas direkt, men när motoreffekterna ökar till flera hundra kilowatt eller flera megawatt blir strömmarna vid låg spänning mycket stora. Höga strömmar leder till ökade förluster, grövre kablage, större komponenter och mer omfattande krav på kylning och installation. Genom att använda mellanspänning kan samma effekt överföras med lägre ström, vilket gör systemet mer hanterbart ur både elektriskt och mekaniskt perspektiv.

Typiska användningsområden för mellanspänningsomriktare återfinns inom processindustri, vatten- och avloppsrening, gruvdrift, petrokemisk industri samt energisektorn. I dessa miljöer används stora elektriska maskiner för att driva exempelvis pumpar, fläktar, kompressorer, kvarnar, transportband och andra kontinuerliga processer. Gemensamt för många av dessa applikationer är att driften ofta pågår under långa tidsperioder och att tillgänglighet, energieffektivitet och driftsäkerhet är avgörande. Ett felaktigt dimensionerat drivsystem kan därför få stora konsekvenser, både tekniskt och ekonomiskt, eftersom ett driftstopp i en större industriell process kan påverka hela anläggningens produktion.

Den grundläggande funktionen hos en mellanspänningsomriktare är att omvandla elektrisk energi från ett nät med fast spänning och frekvens till en utspänning med variabel frekvens och variabel amplitud. Genom att styra frekvensen kan motorns varvtal regleras, medan spänningsnivån anpassas för att ge rätt magnetiskt flöde och momentförmåga i motorn. Detta gör att motorn kan köras efter processens faktiska behov i stället för att vara låst till nätets fasta frekvens. I praktiken innebär detta att flöden, tryck, hastigheter eller moment kan styras mer exakt än vid direkt nätanslutning.

I många industriella processer ger detta betydande energibesparingar [6]. Detta gäller särskilt applikationer med variabelt flöde, såsom pumpar och fläktar, där energibehovet ofta minskar kraftigt när varvtalet reduceras. Utan frekvensomriktare regleras sådana processer ofta genom strypning, spjäll eller ventiler, vilket innebär att motorn fortfarande kan arbeta med hög energiförbrukning även när processen egentligen kräver lägre effekt. Med en omriktare kan i stället motorns varvtal sänkas, vilket gör att systemet arbetar närmare sin verkliga driftpunkt. Detta förbättrar både energieffektiviteten och den mekaniska belastningen på systemet.

Utöver energibesparing bidrar omriktare till minskat mekaniskt slitage. Vid direktstart av stora motorer kan höga startströmmar och kraftiga momentstötar uppstå. Dessa påverkar inte bara motorn, utan även kopplingar, axlar, växellådor, pumphjul, fläktar och annan mekanisk utrustning. En frekvensomriktare möjliggör mjuk start och kontrollerad acceleration, vilket

reducerar mekaniska påfrestningar och kan förlänga livslängden hos både elektriska och mekaniska komponenter. På samma sätt kan kontrollerade stoppförlopp minska risken för tryckslag, vibrationer och andra processrelaterade problem.

2.1.2 Uppbyggnad och tekniska egenskaper

En mellanspänningsomriktare kan principiellt delas in i tre huvuddelar: likriktare, DC-länk och växelriktare. Likriktaren omvandlar nätets växelspänning till likspänning. DC-länken fungerar som ett mellanled där energi lagras och spänningen stabiliseras. Växelriktaren omvandlar därefter likspänningen till en ny växelspänning med önskad frekvens och amplitud. Denna uppbyggnad gör det möjligt att frikoppla motorsidan från nätets fasta frekvens. Även om principen är densamma som i många lågspänningsomriktare är kraven betydligt högre i mellanspänningssystem. Högre spänningsnivåer innebär större krav på isolation, komponentval, kopplingsstrategi, kylning och skydd.

I mellanspänningssystem är spänningsstress på halvledare och motorisolering en central fråga. Varje kopplingstillfälle i omriktaren innebär att spänningen förändras snabbt, vilket kan ge höga dv/dt-värden. Dessa snabba spänningsförändringar kan påverka motorns isolationssystem och ge upphov till elektromagnetiska störningar. Därför används ofta mer avancerade omriktartopologier i MV-system än i enklare lågspänningsapplikationer. Multilevel-omriktare är ett exempel på detta [1]. Genom att bygga upp utspänningen i flera mindre spänningssteg i stället för få stora steg kan spänningspåfrestningen på komponenter och motor reduceras. Samtidigt förbättras vågformens kvalitet, vilket minskar övertonsinnehåll och kan reducera behovet av omfattande filtrering.

En annan viktig skillnad mellan lågspännings- och mellanspänningssystem är att MV-lösningar ofta behöver anpassas mer specifikt till varje projekt. I lågspänningssystem finns ofta mer standardiserade produkter och installationssätt, medan mellanspänningsdrivsystem påverkas starkt av kundens nät, motordata, installationsmiljö och processkrav. Variationer kan uppstå i spänningsnivå, effektområde, kylmetod, omriktartopologi, transformatorutförande, kabellängder, kortslutningsnivå och krav på övertoner. Detta innebär att dimensioneringsprocessen blir mer komplex och att flera tekniska beslut behöver samordnas.

2.1.3 Front-end-topologier: DFE och AFE

En central del av ett MV-drive systems uppbyggnad är valet av front-end-topologi, det vill säga hur omriktaren är ansluten mot matande nät. Två vanliga principiella lösningar är diode front end, DFE, och active front end, AFE. I en diode front end sker likriktningen med dioder. Detta ger en robust och relativt enkel lösning med hög driftsäkerhet och lägre komplexitet. Nackdelen är att diodlikriktare drar icke-sinusformad ström från nätet, vilket skapar övertoner. Dessutom är energiflödet i praktiken enkelriktat, vilket innebär att energi normalt inte kan matas tillbaka till nätet vid bromsning eller regenerativ drift.

För att begränsa övertonerna i DFE-baserade system används ofta multipulslösningar, exempelvis 12-, 24- eller 36-puls [4][7]. Dessa bygger på att flera likriktarbryggor matas från transformatorlindningar med olika fasförskjutning. Genom att kombinera strömmar med olika faslägen kan vissa övertonskomponenter reduceras. Detta innebär att transformatorn får en mycket viktig roll i systemets övertonshantering. Transformatorn blir därmed inte bara en komponent för spänningsanpassning, utan också en del av omriktarens nätgränssnitt och elkvalitetsprestanda.

I en active front end används i stället styrbara halvledarkomponenter, exempelvis IGBT:er, på nätsidan [7]. Detta gör det möjligt att aktivt forma nätströmmen, styra effektfaktorn och minska övertonsinnehållet. En AFE-lösning kan också möjliggöra regenerativ drift, där energi från motorsidan återförs till nätet. Detta är särskilt relevant i applikationer med bromsande laster eller cyklisk drift där energi annars skulle behöva förbrukas i bromsmotstånd. Samtidigt är AFE-system mer komplexa än diodfrontlösningar. De kräver mer avancerad styrning, kan ställa högre krav på filter och behöver analyseras noggrant i förhållande till nätets egenskaper.

Valet mellan DFE och AFE påverkar därför inte bara själva omriktaren, utan hela systemets dimensionering. Det påverkar transformatorns utformning, behovet av filter, interaktionen med nätet, möjligheten till regenerativ drift, effektfaktor, övertonsnivåer och i vissa fall även kostnad och fysisk installation. I ett dimensioneringsverktyg behöver denna typ av val därför behandlas som en systemparameter snarare än en enkel produktinställning. Om användaren väljer en viss front-end princip bör verktyget kunna anpassa efterföljande beräkningar och krav, exempelvis för transformatorns sekundärlindningar, pulstal och inquiry data sheet [4][7].

2.1.4 Systemaspekter vid dimensionering

Nätanslutningen är ytterligare en faktor som gör dimensioneringen av MV-drivsystem komplex. Omriktaren ansluts inte till ett idealiskt nät, utan till ett verkligt elsystem med en viss impedans, kortslutningsnivå och elkvalitet [4]. I ett starkt nät kan omriktarens påverkan på spänning och övertoner bli relativt begränsade, medan ett svagt nät kan vara mer känsligt. Detta innebär att samma omriktare kan vara lämpliga i en anläggning men kräva ytterligare åtgärder i en annan. Kortslutningsnivå, transformatorimpedans och nätets förmåga att hantera kraftelektroniska laster blir därför viktiga parametrar i den tidiga dimensioneringen.

Kylning är också en viktig del av MV-drivsystemets funktion [3]. Vid höga effekter uppstår betydande värmeförluster i halvledare, transformatorer, filter, kablar och hjälpsystem. För att säkerställa lång livslängd och tillförlitlig drift måste värmen avledas på ett kontrollerat sätt. Vissa system är luftkylda, medan andra använder vätskekylning för att hantera högre effekttäthet eller mer krävande installationsmiljöer. Kylmetoden påverkar därmed inte bara systemets fysiska utformning, utan även tillåten belastning, derating, underhåll och installationskrav.

Ur ett reglertekniskt perspektiv möjliggör mellanspänningsomriktare avancerad styrning av motor och process. Beroende på applikation kan styrningen baseras på enklare V/F-styrning eller mer avancerade metoder såsom vektorstyrning. Syftet är att kontrollera moment och varvtal så att systemet följer processens krav på ett stabilt och energieffektivt sätt. I stora industriella system är detta särskilt viktigt eftersom mekaniska laster ofta har stor tröghet och kan kräva kontrollerade accelerationer och retardationer. Regleringen måste därför samspela med både motorns elektriska egenskaper och den mekaniska processens dynamik.

Dimensioneringen av ett MV-drivsystem kan därför inte reduceras till att välja en omriktare med samma eller högre märkeffekt än motorn [1][3]. Ett sådant tillvägagångssätt skulle bortse från flera faktorer som kan vara avgörande i praktiken. Strömkapacitet, frekvensberoende drift, momentkrav, derating, nätets kortslutningsnivå, transformatorns utförande, kylning och övertonshantering måste beaktas tillsammans. Särskilt viktigt är att identifiera vilken parameter som faktiskt är dimensionerande i ett visst fall. I vissa applikationer är det kontinuerlig ström, i andra startmoment, kylning, spänningsnivå eller nätpåverkan.

Det är mot denna bakgrund som behovet av ett strukturerat dimensioneringsverktyg uppstår. När många parametrar samverkar och när teknisk information finns utspridd i datablad, kataloger, manualer och interna erfarenhetsregler blir dimensioneringsprocessen lätt personberoende. En erfaren ingenjör kan ofta göra rimliga bedömningar, men det kan vara svårt att säkerställa att samma bedömning görs konsekvent av olika användare. Ett Excel-baserat verktyg kan bidra till att strukturera processen genom att samla indata, produktdata, beräkningar och resultat i ett gemensamt arbetsflöde.

I detta examensarbete behandlas mellanspänningsomriktaren därför inte som en isolerad komponent, utan som en del av ett större elektriskt drivsystem. Verktyget som utvecklas ska kunna koppla samman motordata, nätdata och omriktardata med transformator- och systemkrav. Genom detta blir det möjligt att skapa ett mer spårbart underlag för tekniska beslut i tidiga projektfaser. Detta är särskilt viktigt i industriella sammanhang där ett felaktigt val kan leda till omprojektering, ökade kostnader eller driftproblem längre fram.

2.2 Effekt, ström och grundläggande dimensionering

Den grundläggande dimensioneringen av elektriska drivsystem utgår från sambandet mellan effekt, spänning och ström i trefassystem. I ett symmetriskt trefassystem kan den aktiva effekten uttryckas som följande:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \tag{2.1}$$

där P är aktiv effekt, U är linjespänning, I är linjeström och cosφ är effektfaktorn. Sambandet är centralt eftersom det visar hur mycket ström som krävs för att överföra en viss aktiv effekt vid en given spänningsnivå och effektfaktor. I ett dimensioneringssammanhang används detta som utgångspunkt för att bestämma belastningen på omriktare, transformator, kablage och inmatningsutrustning. Även om uttrycket är relativt enkelt utgör det grunden för många av de beslut som måste fattas vid dimensionering av ett mellanspänningsdrivsystem.

I praktiska tillämpningar är det dock inte tillräckligt att enbart utgå från motorns mekaniska uteffekt. Den effekt som anges för en motor avser ofta den mekaniska effekt som motorn kan leverera på axeln, medan den elektriska effekt som behöver tillföras från omriktare och nät är högre. Skillnaden beror på förluster i motorn, exempelvis kopparförluster i lindningar, järnförluster i magnetkretsen, mekaniska förluster och ventilationsförluster. Även omriktaren har egna förluster i form av ledningsförluster, switchförluster och förluster i hjälpsystem. Därför måste verkningsgraden inkluderas när den elektriska dimensioneringen görs.

Den elektriska effekten kan förenklat skrivas som:

$$p_{el} = \frac{p_{mek}}{\eta} \tag{2.2}$$

där p_{el} är den elektriska effekten som behöver tillföras, p_{mek} är den mekaniska uteffekten och η är verkningsgraden. Om både effektfaktor och verkningsgrad beaktas kan den dimensionerande linjeströmmen uttryckas som:

$$I = \frac{p_{mek}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot cos\varphi \cdot \eta} \tag{2.3}$$

Detta uttryck visar att strömmen ökar om effektfaktorn eller verkningsgraden minskar. Det innebär att två system med samma mekaniska effekt och samma spänningsnivå kan ge olika strömbelastning beroende på motorns egenskaper, omriktarens verkningsgrad och driftförhållanden. Därför är det viktigt att dimensioneringsverktyget inte enbart använder motoreffekten som urvalskriterium, utan också tar hänsyn till de parametrar som påverkar den faktiska strömmen.

I mellanspänningssystem är strömmen ofta den mest dimensionerande storheten. Detta beror på att många av komponenternas begränsningar i första hand är termiska. Halvledare i omriktaren, transformatorlindningar, kablar, skenor och anslutningar utsätts alla för värmeutveckling som är starkt kopplad till strömmen. Resistiva förluster kan i förenklad form beskrivas som:

$$P_{förlust} = I^2 * R \tag{2.4}$$

där R är resistansen. Sambandet visar att en ökning av strömmen får en kvadratisk påverkan på förlusterna. Om strömmen exempelvis ökar med 10 procent ökar de resistiva förlusterna med ungefär 21 procent, förutsatt att resistansen är oförändrad. Detta illustrerar varför även

relativt små fel i strömberäkningen kan få betydande konsekvenser för termisk belastning, livslängd och systemets tillförlitlighet.

Det är därför inte tillräckligt att endast dimensionera efter nominell driftström. I många industriella applikationer kan den största belastningen uppstå under andra driftfall än kontinuerlig märkdrift. Startförlopp, acceleration av stora roterande massor, momenttoppar, processvariationer eller drift vid låg frekvens kan leda till att omriktaren behöver leverera högre ström än vid den nominella driftpunkten. Om dessa driftfall inte beaktas finns en risk att omriktare, transformator eller kablage dimensioneras för snävt. Det kan i sin tur leda till överhettning, reducerad livslängd, strömbegränsning eller att skyddsfunktioner löser ut under normal drift.

Effektfaktorn har också stor betydelse i dimensioneringen. En låg effektfaktor innebär att en större ström krävs för att överföra samma aktiva effekt. Detta ökar belastningen på nät, transformator, kablar och omriktare, även om den nyttiga aktiva effekten är densamma. I traditionella AC-system är effektfaktorn ofta kopplad till förhållandet mellan aktiv och reaktiv effekt, men i omriktarsystem påverkas den även av front-end-topologi och hur systemet interagerar med nätet. En diode front end-lösning kan ge en annan strömform och ett annat effektfaktorbeteende än en active front end-lösning. En active front end kan i många fall styra nätströmmen mer aktivt och därmed förbättra effektfaktorn, medan en diodfront ofta är enklare men ger större beroende av nätets impedans och belastningsförhållanden.

Spänningsnivån är en annan avgörande parameter. För en given effekt innebär högre spänning lägre ström, vilket är en av huvudorsakerna till att mellanspänningslösningar används vid höga effekter. Lägre ström minskar de resistiva förlusterna och gör det möjligt att använda rimligare kabeldimensioner och komponentstorlekar. Samtidigt innebär högre spänning ökade krav på isolation, säkerhetsavstånd, komponentval, kapsling och installation. Dimensionering av MV-drivsystem innebär därför alltid en avvägning mellan fördelarna med lägre strömmar och de tekniska krav som följer av högre spänningsnivåer.

I praktiska industriella system väljs spänningsnivån ofta utifrån befintligt nät, motorstandarder och tillgängliga omriktarplattformar. Det innebär att dimensioneringsverktyget behöver kunna hantera flera olika spänningsnivåer och samtidigt säkerställa att valda komponenter är kompatibla med varandra. En omriktare kan exempelvis vara lämplig utifrån effekt men olämplig utifrån spänningsområde eller strömkapacitet. På samma sätt kan en transformator behöva anpassas för att matcha både nätets primärspänning och omriktarens sekundärspänningskrav. Detta visar varför dimensioneringen måste göras som ett sammanhängande systemval snarare än som separata komponentberäkningar.

Den beräknade strömmen används därför som en central ingång i flera delar av dimensioneringskedjan. För omriktaren jämförs den dimensionerande strömmen med omriktarens tillåtna ström, ofta efter att derating och eventuella överlastkrav har beaktats. För transformatorn används strömmen tillsammans med spänningsnivån för att bestämma skenbar effekt och märkström på primär- och sekundärsida. För kablar används strömmen för att bedöma termisk belastning och spänningsfall. För inmatningsutrustning och skydd påverkar

strömmen vilka komponenter som är tekniskt lämpliga. På så sätt blir strömmen den parameter som binder samman flera av systemets huvudkomponenter.

Det är även viktigt att skilja mellan olika strömbegrepp i dimensioneringsprocessen. Den beräknade lastströmmen beskriver den ström som krävs för att driva motorn under givna förhållanden. Den dimensionerande strömmen kan därefter vara högre, eftersom den inkluderar derating, driftfall eller designmarginaler. Omriktarens märkström beskriver vad omriktaren klarar under specificerade referensförhållanden, medan kabelns tillåtna ström anger dess termiska bärförmåga beroende på material och förläggningssätt. Dessa storheter får inte blandas ihop. Ett verktyg som tydligt skiljer mellan lastström, tillåten komponentström och dimensionerande ström blir lättare att granska och minskar risken för feltolkning.

I det utvecklade Excel-baserade dimensioneringsverktyget utgör strömberäkningen därför ett av de första och mest centrala beräkningsstegen. Användaren matar in motoreffekt, spänningsnivå, effektfaktor och verkningsgrad. Verktyget använder dessa värden för att beräkna en grundläggande lastström. Därefter kan strömmen justeras med hänsyn till driftförhållanden, derating och designmarginaler. Den korrigerade strömmen används sedan i efterföljande delar av verktyget, bland annat för att välja lämplig omriktare, kontrollera frekvensberoende drift, dimensionera transformatorns märkdata och bedöma kablage.

En viktig fördel med att strukturera verktyget på detta sätt är att beräkningskedjan blir spårbar. Användaren kan se hur indata påverkar den första strömberäkningen, hur denna förändras när derating eller marginaler införs och hur den slutligen påverkar val av komponenter. Detta är särskilt viktigt i industriell dimensionering, där tekniska beslut ofta behöver kunna motiveras inför flera aktörer, exempelvis säljingenjörer, systemingenjörer, kund och leverantörer. Ett transparent verktyg gör det möjligt att inte bara visa vilket resultat som erhålls, utan också varför resultatet uppstår.

I sammanhanget är det också viktigt att påpeka att den grundläggande effekt- och strömberäkningen inte ensam kan avgöra om ett drivsystem är korrekt dimensionerat. Den utgör snarare grunden för fortsatt analys. När lastströmmen är beräknad måste den relateras till frekvensberoende drift, momentkrav, derating, transformatorval, kortslutningsnivå och nätpåverkan. Detta är anledningen till att dimensioneringsverktyget inte enbart består av en enkel formel, utan av en struktur där flera tekniska kontroller kopplas samman.

2.3 Frekvensberoende drift och momentkarakteristik

En av de mest grundläggande egenskaperna hos en frekvensomriktare är möjligheten att styra en elektrisk maskins drift över ett kontinuerligt frekvensområde. Till skillnad från en direktnätansluten motor, där varvtalet i huvudsak bestäms av nätfrekvensen, kan en omriktardriven motor anpassas till processens aktuella behov. Detta innebär att motorn inte behöver arbeta vid en enda fast driftpunkt, utan kan drivas vid olika hastigheter, momentnivåer och belastningsförhållanden. För industriella processer är

detta av stor betydelse, eftersom många applikationer inte kräver full hastighet eller full effekt under hela drifttiden. Genom att anpassa varvtalet kan energianvändningen reduceras, samtidigt som mekaniska påfrestningar på motor, kopplingar, pumpar, fläktar och annan ansluten utrustning minskar.

För en asynkronmotor är det synkrona varvtalet direkt kopplat till matningsfrekvensen och antalet poler enligt sambandet:

$$n_s = \frac{120*f}{p} \tag{2.5}$$

där n_s är synkronvarvtalet, f är frekvensen och p är antalet poler. Sambandet visar att varvtalet kan påverkas direkt genom att frekvensen ändras. En frekvensomriktare gör detta möjligt genom att först omvandla nätets växelspänning till likspänning och därefter skapa en ny växelspänning med önskad frekvens och amplitud. På så sätt kan motorn styras oberoende av nätets fasta frekvens. Detta är en av de viktigaste anledningarna till att frekvensomriktare används i moderna industriella drivsystem.

När frekvensen ändras måste även spänningen anpassas för att motorns magnetiska flöde ska hållas på en lämplig nivå. Om frekvensen sänks utan att spänningen sänks i motsvarande grad kan magnetflödet bli för högt, vilket kan leda till mättning i maskinen och ökade förluster. Om spänningen däremot är för låg i förhållande till frekvensen minskar flödet, vilket leder till reducerad momentförmåga. Därför används ofta ett ungefärligt konstant V/f-förhållande upp till motorns basfrekvens. Detta innebär att spänningen ökas proportionellt med frekvensen för att upprätthålla ett relativt konstant magnetiskt flöde i maskinen.

Driften av en frekvensomriktardriven motor kan vanligtvis delas in i två huvudsakliga områden: ett område med konstant moment och ett område med konstant effekt. I området upp till basfrekvensen kan omriktaren normalt öka spänningen i takt med frekvensen, vilket gör att motorns magnetiska flöde kan hållas ungefär konstant. Under dessa förhållanden kan motorn leverera ett i princip konstant moment. Eftersom momentet i stor utsträckning är kopplat till strömmen innebär detta att strömmen är en mycket viktig dimensionerande storhet i detta område. Om processen kräver högt moment vid låg hastighet kan omriktaren därför behöva leverera en hög ström även om den mekaniska effekten inte är maximal.

Vid frekvenser över basfrekvensen uppstår en annan begränsning. Omriktaren kan då inte längre öka utspänningen proportionellt med frekvensen, eftersom den maximala tillgängliga spänningen redan har uppnåtts. När frekvensen fortsätter att öka medan spänningen är begränsad minskar det magnetiska flödet i maskinen. Detta leder till att motorns maximala moment sjunker. Samtidigt kan den mekaniska effekten hållas ungefär konstant inom ett visst område, eftersom effekten ges av följande samband:

$$P=T \cdot \omega \tag{2.6}$$

där P är mekanisk effekt, T är moment och ω är vinkelhastighet. När hastigheten ökar kan alltså ett lägre moment fortfarande motsvara ungefär samma effekt. Detta område benämns

därför ofta konstant effekt-området. Skillnaden mellan konstant moment och konstant effekt är viktig vid dimensionering, eftersom det avgör om ström, spänning, moment eller effekt är den mest begränsande faktorn vid en viss driftpunkt.

För dimensioneringen av en mellanspänningsomriktare innebär detta att ström, moment och effekt inte kan betraktas som konstanta storheter. De varierar med frekvens, lasttyp och driftläge. I det konstanta momentområdet kan strömmen bli dimensionerande, särskilt vid låga frekvenser och höga momentkrav. Detta gäller exempelvis vid acceleration av stora roterande massor, start av tunga laster eller processer där högt moment krävs vid låg hastighet. I det konstanta effektområdet blir istället spänningsbegränsningen och omriktarens maximala effektkapacitet mer avgörande. Ett korrekt dimensioneringsunderlag måste därför beskriva hur systemets belastning förändras över hela det relevanta frekvensområdet.

En viktig konsekvens är att den mest kritiska driftpunkten inte alltid sammanfaller med den nominella driftpunkten. En motor kan exempelvis ha en märkpunkt vid 50 Hz, men om applikationen kräver högt moment vid 10 eller 20 Hz kan strömbehovet i dessa driftpunkter vara mer avgörande för omriktarvalet. På samma sätt kan en applikation som arbetar över basfrekvensen ställa krav på att omriktaren klarar ett visst effektuttag trots att momentet minskar. Om dimensioneringen enbart utgår från märkdata vid nominell frekvens finns därför en risk att viktiga belastningsfall förbises. Detta kan leda till att omriktaren väljs för snävt, vilket i praktiken kan orsaka strömbegränsning, överhettning, reducerad prestanda eller oönskade driftstopp.

Belastningens karaktär spelar också stor roll. Pumpar och fläktar har ofta en belastningsprofil där momentet varierar kraftigt med hastigheten, medan exempelvis transportband, kvarnar eller kompressorer kan ha andra momentkrav. För vissa laster minskar effektbehovet kraftigt vid reducerat varvtal, vilket gör frekvensstyrning mycket energieffektiv. För andra laster krävs däremot högt moment över ett större frekvensområde. Ett dimensioneringsverktyg bör därför inte enbart hantera motorns märkeffekt, utan även ge möjlighet att beakta hur lasten beter sig över frekvensområdet. Detta är särskilt relevant i mellanspänningssystem, där felaktiga val kan få stora tekniska och ekonomiska konsekvenser.

Frekvensberoende drift påverkar även kylning och termisk belastning. Vid lägre hastigheter kan motorns egenkylning försämras om kylfläkten är monterad på motoraxeln och därmed roterar långsammare. Samtidigt kan motorn behöva leverera högt moment och därmed dra hög ström. Detta kan leda till en driftpunkt där den termiska belastningen är hög trots att den mekaniska effekten inte är maximal. Även omriktaren påverkas av denna typ av drift, eftersom hög ström innebär högre ledningsförluster i halvledare och andra strömförande komponenter. Därför behöver frekvensberoende drift ses i nära samband med derating och termisk dimensionering.

För att kunna bedöma dessa förhållanden på ett systematiskt sätt är kurvor och tabeller över frekvens, motorström, moment och effekt viktiga hjälpmedel. En grafisk representation gör det möjligt att se hur lasten utvecklas över driftområdet och att identifiera de punkter där kraven på omriktaren är störst. Exempelvis kan en kurva över motorström som funktion av

frekvens visa om strömmen överskrider omriktarens tillåtna område vid vissa hastigheter. På motsvarande sätt kan en momentkurva visa om motorns och omriktarens momentkapacitet räcker för applikationens krav. Effektkurvan kan i sin tur användas för att bedöma om systemet arbetar inom omriktarens effektgränser.

I detta examensarbete har frekvensberoende analys därför en viktig roll i det Excel-baserade dimensioneringsverktyget. Verktyget ska inte enbart beräkna en dimensionerande ström utifrån en nominell effekt, utan även kunna visualisera hur ström, moment och effekt varierar över ett valt frekvensområde. Genom att skapa grafer för exempelvis frekvens mot motorström, frekvens mot moment och frekvens mot effekt kan användaren få en tydligare bild av hur systemet belastas. Detta gör dimensioneringsprocessen mer transparent och gör det lättare att identifiera om en viss driftpunkt ligger nära eller utanför omriktarens kapacitet.

En ytterligare styrka med en sådan implementering är att kurvorna kan jämföras med omriktarens tillåtna driftområde. Tillverkare anger ofta kapacitetsgränser, överlastförmåga eller deratingkurvor som beskriver hur mycket ström eller effekt som får tas ut under olika förhållanden. Genom att lägga in dessa data i verktyget kan användaren jämföra applikationens behov med omriktarens faktiska begränsningar. Detta ger ett mer realistiskt beslutsunderlag än en enkel jämförelse mellan motoreffekt och omriktarens märkeffekt. Om kurvorna visar att applikationen kräver högre ström än vad omriktaren kan leverera vid en viss frekvens kan verktyget indikera att en större omriktare eller en annan konfiguration behöver väljas.

Den frekvensberoende analysen är också viktig för att skapa en logisk koppling mellan omriktarval och transformatorberäkning. Transformatorn dimensioneras i huvudsak utifrån spänning, ström och skenbar effekt, men dessa storheter påverkas av omriktarens driftområde och belastningsprofil. Om den dimensionerande strömmen uppstår vid ett annat driftfall än nominell drift bör detta beaktas även i transformatorns förfrågningsunderlag. På så sätt blir transformatorn inte dimensionerad utifrån en förenklad märkpunkt, utan utifrån den belastning som systemet faktiskt kan behöva hantera.

Ur ett ingenjörsmässigt perspektiv innebär frekvensberoende analys en övergång från statisk till mer systemorienterad dimensionering. I en statisk dimensionering betraktas systemet ofta vid en enda driftpunkt, exempelvis nominell effekt vid nominell frekvens. Detta kan vara tillräckligt i enkla fall, men är otillräckligt för mer komplexa MV-drivsystem. Genom att inkludera hela driftområdet kan dimensioneringen bättre spegla verkliga förhållanden. Detta ökar sannolikheten att det valda systemet fungerar stabilt, säkert och effektivt även vid varierande last.

Samtidigt är det viktigt att betona att den frekvensberoende analysen i ett Excel-baserat dimensioneringsverktyg är en förenklad representation av verkligheten. Den ersätter inte detaljerade dynamiska simuleringar, motoranalyser eller tillverkarens egna beräkningsmodeller. Däremot fyller den en viktig funktion i tidiga projektfaser genom att synliggöra driftområden och dimensionerande punkter på ett överskådligt sätt. Detta gör det

möjligt att tidigt upptäcka när en lösning behöver utredas vidare eller när en omriktare inte bör väljas utifrån enbart nominell effekt.

2.4 Derating och driftförhållanden

Vid dimensionering av elektriska drivsystem är det inte tillräckligt att enbart utgå från komponenters nominella märkdata [3]. Märkdata anges vanligtvis under definierade referensförhållanden, exempelvis en viss omgivningstemperatur, normal kylning, bestämd installationsmiljö och drift inom ett specificerat belastningsområde. I verkliga industriella tillämpningar avviker driftförhållandena ofta från dessa referensvärden. Det innebär att komponentens faktiska belastningsförmåga kan vara lägre än den nominella kapacitet som anges i datablad eller produktdokumentation. För att ta hänsyn till detta används begreppet derating, vilket innebär att komponentens tillåtna belastning reduceras med hänsyn till verkliga driftförhållanden.

För mellanspänningsomriktare är derating särskilt betydelsefullt, eftersom dessa system ofta arbetar vid höga effektnivåer och med stora strömmar. Även relativt små avvikelser i driftmiljö kan därför få märkbar påverkan på systemets termiska belastning och långsiktiga tillförlitlighet. De faktorer som normalt påverkar derating är bland annat omgivningstemperatur, kylmetod, installationsmiljö, höjd över havet, belastningsprofil samt drift vid olika frekvenser. Dessa faktorer påverkar framför allt hur mycket ström omriktaren kan leverera kontinuerligt utan att interna komponenter överhettas eller utsätts för förkortad livslängd.

Temperatur är en av de mest avgörande faktorerna vid derating. Kraftelektroniska komponenter, såsom IGBT:er, dioder och andra halvledarkomponenter, utvecklar värme under drift. Denna värme uppstår framför allt genom ledningsförluster och switchförluster. Ledningsförlusterna är starkt kopplade till strömmen, medan switchförluster påverkas av bland annat switchfrekvens, spänningsnivå och komponentens arbetspunkt. Om värmen inte avleds tillräckligt effektivt stiger komponenttemperaturen, vilket kan leda till att omriktaren begränsar sin utström eller i värsta fall löser ut på grund av övertemperatur.

Den termiska belastningen är inte bara en fråga om omedelbar driftförmåga, utan även om komponenternas livslängd. Elektroniska och kraftelektroniska komponenter påverkas av upprepade temperaturcykler, där uppvärmning och avkylning skapar mekaniska och termiska påfrestningar i material och förbindningar. En omriktare som återkommande arbetar nära sin termiska gräns kan därför få reducerad livslängd även om den inte omedelbart överbelastas. Därför används derating inte enbart för att undvika akuta fel, utan också för att skapa tillräckliga driftsmarginaler över tid.

Vid högre omgivningstemperatur minskar omriktarens förmåga att avleda värme till omgivningen. Detta innebär att den maximalt tillåtna strömmen måste reduceras jämfört med märkströmmen vid referensförhållanden. Denna reduktion kan beskrivas med en deratingfaktor, exempelvis kT, där den tillåtna strömmen uttrycks som:

$$I_{tillåten} = K_T * I_{nominell} \quad (2.7)$$

där K_T är mindre än 1 när temperaturen ligger över den nivå som omriktaren är nominellt specificerad för. En sådan modell visar tydligt att samma omriktare kan ha olika faktisk kapacitet beroende på var och hur den installeras. En omriktare som är fullt tillräcklig i ett svalt och välventilerat utrymme kan alltså vara otillräcklig i en varm industrimiljö med begränsad luftcirkulation.

Kylmetoden har också en direkt påverkan på hur mycket effekt och ström en omriktare kan hantera. Luftkylda system är ofta enklare, mer kostnadseffektiva och lättare att underhålla, men deras kapacitet begränsas av luftflöde, omgivningstemperatur och utrymmets ventilation. Vätskekylda system kan i många fall hantera högre effekttäthet, eftersom värme transporteras bort mer effektivt än med luft. Detta gör vätskekylning attraktivt i applikationer med höga effektnivåer eller begränsat installationsutrymme. Samtidigt innebär vätskekylning ökad systemkomplexitet, eftersom pumpar, värmeväxlare, slangar, flödesövervakning och underhåll måste beaktas.

Installationsmiljön är därför lika viktig som själva omriktarens märkdata. En omriktare installerad i ett välventilerat kontrollrum har andra förutsättningar än en omriktare placerad i ett trångt utrymme, nära värmealstrande utrustning eller i en miljö med damm, fukt eller begränsat luftflöde. Kapsling och skyddsklass kan dessutom påverka kylningen. En tät kapsling kan krävas av miljöskäl, men den kan samtidigt försämra värmeavledningen om den inte kombineras med tillräcklig ventilation eller kylning. Därmed blir derating en länk mellan elektrisk dimensionering och praktisk installation.

Höjd över havet är ytterligare en faktor som kan påverka dimensioneringen. Vid högre höjd minskar luftens densitet, vilket försämrar luftens kylförmåga. Detta påverkar framför allt luftkylda system, där värmeöverföringen till omgivningen är beroende av luftflöde och luftens termiska egenskaper. Den lägre luftdensiteten påverkar även isolationshållfastheten, eftersom luftens förmåga att isolera mellan spänningssatta delar minskar. I mellanspänningssystem, där isolationsnivåer och säkerhetsavstånd är särskilt viktiga, kan detta medföra krav på ytterligare marginaler eller anpassad konstruktion. En installation på hög höjd kan därför kräva att en större omriktare väljs, även om den elektriska lasten i sig inte har förändrats.

Belastningsprofilen har också stor betydelse för derating. I många industriella applikationer är lasten inte konstant, utan varierar över tid. Vissa processer har jämn kontinuerlig drift, medan andra kännetecknas av återkommande accelerationer, startförlopp, momenttoppar eller perioder med högre belastning. En omriktare kan ofta ha en viss överlastförmåga under begränsad tid, men denna förmåga är inte avsedd för kontinuerlig drift. Om överlasten upprepas ofta eller varar länge kan den termiska belastningen bli betydligt större än vad en enkel nominell beräkning visar.

Detta är särskilt viktigt i system där stora roterande massor ska accelereras eller där processen kräver högt moment vid låg hastighet. Vid låga frekvenser kan motorns kylning vara sämre, särskilt om motorn har egenfläkt som är beroende av varvtalet. Samtidigt kan momentkravet vara högt, vilket leder till hög ström. Om denna driftpunkt inte beaktas i dimensioneringen kan både motor och omriktare belastas hårdare än vad märkdata vid nominell frekvens antyder. Därför behöver derating och driftprofil behandlas tillsammans med de frekvensberoende ström- och momentkurvor som används i dimensioneringsprocessen.

En viktig metodisk fråga är i vilken ordning derating och designmarginaler ska appliceras. Om alla säkerhetsfaktorer läggs på samtidigt, utan tydlig separation, blir beräkningen svår att granska och det blir otydligt vad som faktiskt driver dimensioneringen. En mer transparent metod är att först beräkna den teoretiskt erforderliga strömmen utifrån motor- och nätdata. Därefter appliceras deratingfaktorer kopplade till verkliga driftförhållanden, exempelvis temperatur, kylning och höjd över havet. Först i ett senare steg läggs en designmarginal till för att skapa robusthet och ta höjd för osäkerheter. På detta sätt kan användaren följa hur varje faktor påverkar slutresultatet.

Denna uppdelning är även viktig ur ett kostnads- och optimeringsperspektiv. Om verktyget dimensionerar alltför försiktigt kan resultatet bli överdimensionerade system med högre investeringskostnad, större fysisk storlek och onödigt materialutnyttjande. Om verktyget däremot är för optimistiskt kan systemet bli tekniskt otillräckligt och riskera driftstörningar. En välbalanserad deratingmodell ska därför inte bara maximera säkerheten, utan skapa en rimlig teknisk avvägning mellan driftsäkerhet, kostnad och praktisk användbarhet.

I det utvecklade Excel-baserade dimensioneringsverktyget behandlas derating som en separat och tydligt definierad del av dimensioneringskedjan. Verktyget beräknar först en grundläggande lastström utifrån motoreffekt, spänning, effektfaktor och verkningsgrad. Denna ström representerar det teoretiska behovet under nominella förhållanden. Därefter kan strömmen korrigeras med hjälp av deratingfaktorer som representerar de aktuella driftförhållandena. Slutligen kan en designmarginal tillämpas för att skapa en slutlig dimensionerande ström som används vid val av omriktare och transformator.

Genom denna struktur kan verktyget skilja mellan tre nivåer av ström: den teoretiskt erforderliga strömmen, den korrigerade strömmen efter derating och den slutliga dimensionerande strömmen inklusive marginal. Detta gör beräkningen mer spårbar och gör det möjligt att se om det främst är själva lasten, omgivningsförhållandena eller säkerhetsmarginalen som gör att en större omriktare krävs. För en användare är detta värdefullt, eftersom det inte bara ger ett resultat utan också visar varför resultatet uppstår.

Derating påverkar även transformator- och kabeldimensionering indirekt. Om omriktaren behöver väljas större på grund av ogynnsamma driftförhållanden kan detta påverka vilka ström- och effektvärden som ska anges i transformatorns förfrågningsunderlag. På samma sätt kan högre dimensionerande ström påverka kabelarea, spänningsfall och termiska belastningar. Därför är derating inte en isolerad justering av omriktaren, utan en faktor som

kan få konsekvenser för hela drivsystemet. Detta är en av anledningarna till att derating integreras i verktygets övergripande logik.

I praktiken är tillgången till korrekta deratingdata avgörande. Sådana data kan komma från tillverkarens datablad, interna dimensioneringsregler eller produktmanualer. Om deratingtabeller saknas eller är ofullständiga måste verktyget antingen använda konservativa antaganden eller tydligt ange att resultatet kräver vidare kontroll. Det är därför viktigt att verktyget inte döljer osäkerheter. Om en deratingfaktor bygger på ett antagande bör detta framgå, så att användaren förstår begränsningen och kan kontrollera värdet mot relevant dokumentation vid behov.

Ur ett ingenjörsmässigt perspektiv är korrekt hantering av derating avgörande för att uppnå en tillförlitlig dimensionering. En underskattning av driftförhållanden kan leda till överhettning, driftstopp eller förkortad livslängd, medan en överdrivet konservativ dimensionering kan leda till onödiga kostnader och sämre resursutnyttjande. Den metodik som används i detta arbete syftar därför till att skapa en transparent och systematisk process där derating behandlas som ett tydligt beräkningssteg, snarare än som en osynlig säkerhetsfaktor.

2.5 Transformatorer i MV-drivsystem

Transformatorn utgör en central komponent i mellanspänningsdrivsystem och har en avgörande betydelse för systemets funktion, integration och driftsäkerhet [5]. Dess mest grundläggande uppgift är att anpassa spänningsnivån mellan elnätet och omriktaren, men i praktiken har transformatorn flera andra funktioner som är minst lika viktiga för systemets totala prestanda. I ett MV-drivsystem fungerar transformatorn som en gränsyta mellan nätets egenskaper och omriktarens elektriska krav. Detta innebär att transformatorn inte enbart kan betraktas som en passiv komponent för spänningsomvandling, utan som en aktiv del av systemets elektriska uppbyggnad.

I många industriella applikationer placeras transformatorn mellan matande nät och omriktare. Den kan då anpassa nätspänningen till den spänningsnivå som krävs av omriktaren, men även skapa galvanisk isolering mellan nät och drivsystem. Den galvaniska isoleringen förbättrar elsäkerheten och minskar risken för att störningar sprids mellan olika delar av anläggningen. Detta är särskilt relevant i industriella miljöer där stora motorer, kraftelektroniska system och annan känslig utrustning ofta är anslutna till samma nät. Transformatorn bidrar därmed både till funktionell integration och till en mer kontrollerad elektrisk miljö.

Utöver spänningsanpassning och isolering har transformatorn en viktig roll i hanteringen av övertoner. I drivsystem med diode front end, där likriktningen sker med dioder, uppstår strömmar som inte är sinusformade [4][7]. Detta leder till övertoner som kan påverka nätkvaliteten negativt. För att reducera sådana övertoner används ofta multipulslösningar, exempelvis 12-, 24- eller 36-puls. Dessa lösningar bygger på att transformatorn skapar definierade fasförskjutningar mellan flera sekundärlindningar, vilket gör att vissa

övertonskomponenter kan reduceras genom att de delvis tar ut varandra. På detta sätt blir transformatorns lindningsuppbyggnad och kopplingsgrupp direkt kopplade till systemets harmoniska egenskaper.

Detta innebär att transformatorns tekniska utformning får konsekvenser långt utöver själva spänningsnivån. Om transformatorn inte är korrekt specificerad kan övertonsdämpningen bli otillräcklig, vilket i sin tur kan leda till ökad spänningsdistorsion, högre förluster och potentiella problem med nätanslutning. I ett starkt nät kan vissa övertoner få mindre påverkan, medan samma övertonsinnehåll i ett svagare nät kan ge betydligt större konsekvenser. Transformatorn blir därför en viktig komponent i samspelet mellan omriktare och nät, särskilt i system där diodfront och multipulslösningar används.

Vid dimensionering av transformatorer i MV-drivsystem måste flera elektriska och praktiska parametrar beaktas samtidigt. De mest grundläggande är primärspänning, sekundärspänning, märkström och märkeffekt. Primärspänningen måste anpassas till det matande nätets spänningsnivå, medan sekundärspänningen måste motsvara omriktarens krav. Om dessa nivåer inte stämmer överens kan omriktaren inte arbeta inom sitt avsedda driftområde. Strömmen på både primär- och sekundärsida måste dessutom beräknas för att säkerställa att lindningar, kablage och anslutningar klarar den termiska belastningen.

Transformatorns skenbara effekt kan i ett trefassystem beräknas enligt:

$$S = \sqrt{3} * U * I \tag{2.8}$$

där S är skenbar effekt, U är linjespänning och I är linjeström. Denna storhet är central eftersom transformatorer normalt dimensioneras i kVA eller MVA, snarare än enbart utifrån aktiv effekt. Det beror på att transformatorn måste kunna hantera både aktiv och reaktiv effekt samt de strömmar som följer av den totala belastningen. Vid praktisk dimensionering behöver man dessutom ta hänsyn till verkningsgrad, effektfaktor, kontinuerlig drift, överlastförhållanden och eventuella säkerhetsmarginaler. En transformator som dimensioneras för snävt kan få förhöjd temperatur, reducerad livslängd eller begränsad driftförmåga vid varierande last.

En annan viktig parameter är transformatorns kortslutningsimpedans, ofta uttryckt som kortslutningsspänning i procent. Den påverkar både spänningsfall under belastning och kortslutningsström på sekundärsidan. En högre impedans begränsar felströmmar och kan därmed minska kraven på nedströms utrustning, men leder samtidigt till större spänningsfall och kan påverka omriktarens inspänning. En lägre impedans ger bättre spänningshållning, men kan medföra högre kortslutningsströmmar. Valet av transformatorimpedans innebär därför en teknisk avvägning mellan skydd, spänningsstabilitet och systemprestanda.

Transformatorns kopplingsgrupp, eller vektorgrupp, beskriver hur primär- och sekundärlindningarna är kopplade samt vilken fasförskjutning som uppstår mellan de olika sidorna. Detta är särskilt viktigt i mellanspänningsdrivsystem där transformatorn används för multipulslikriktning. En vanlig vektorgrupp i industriella sammanhang är Dyn11, där

primärsidan är deltakopplad, sekundärsidan stjärnkopplad med neutralpunkt och fasförskjutningen motsvarar klocktal 11. Andra kopplingsgrupper, såsom YNyn0, Yzn11 eller Dzn0, kan användas beroende på krav på jordning, fasförskjutning och systemets harmoniska egenskaper. Valet av vektorgrupp påverkar därmed både övertonshantering, jordningsförhållanden och skyddsfilosofi.

I multipulssystem blir vektorgruppen ännu mer betydelsefull eftersom rätt fasförskjutning är en förutsättning för att övertonsdämpningen ska fungera. Vid exempelvis 12-puls krävs två likriktarbryggor med inbördes fasförskjutning, medan 24- och 36-pulssystem kräver fler sekundärsystem och mer avancerad transformatoruppbyggnad. Detta innebär att transformatorn i sådana system inte kan väljas enbart från en generell standardlista utan måste anpassas till omriktarens front-end-konfiguration. Om transformatorn inte ger rätt fasförskjutning förloras en stor del av multipulssystemets funktion.

Kylmetoden är ytterligare en parameter som påverkar transformatorns dimensionering och användbarhet. Transformatorer utvecklar värme på grund av kopparförluster i lindningarna och järnförluster i kärnan. För att säkerställa lång livslängd och tillförlitlig drift måste denna värme avledas effektivt. Vanliga kylbeteckningar är exempelvis ONAN, ONAF och OFWF. ONAN betyder Oil Natural Air Natural och innebär att både oljecirkulationen och luftkylningen sker naturligt. ONAF betyder Oil Natural Air Forced och innebär att oljan cirkulerar naturligt men att luftkylningen förstärks med fläktar. OFWF betyder Oil Forced Water Forced och innebär att både oljecirkulation och kylning sker med tvångsflöde, ofta för högre effekter eller mer krävande installationer.

Valet av kylmetod påverkar transformatorns effektkapacitet, fysiska storlek, installationskrav och underhållsbehov. En transformator med forcerad kylning kan ofta belastas högre eller göras mer kompakt än en transformator med naturlig kylning, men systemet blir samtidigt mer komplext eftersom fläktar, pumpar eller kylsystem måste fungera korrekt. I ett dimensioneringsverktyg är det därför viktigt att kylmetoden inte behandlas som enbart en administrativ uppgift, utan som en teknisk parameter som påverkar transformatorns användbarhet och möjliga standardval.

En praktiskt viktig fråga vid transformatorval är om behovet kan täckas av en standardtransformator eller om en specialbyggd transformator krävs. Standardtransformatorer har normalt fördefinierade kombinationer av effekt, spänning, vektorgrupp, kylning och andra tekniska egenskaper. De har ofta kortare leveranstid och lägre kostnad eftersom konstruktion och tillverkning redan är etablerad. Samtidigt är standardtransformatorer begränsade till de specifikationer som finns tillgängliga. Om ett MV-drivsystem kräver en ovanlig sekundärspänning, särskild vektorgrupp, multipla sekundärlindningar eller specifikt pulstal kan en standardtransformator vara otillräcklig.

När en standardtransformator inte motsvarar kraven behöver en specialtransformator specificeras. För detta krävs ett mer detaljerat tekniskt underlag, ofta i form av ett inquiry data sheet. Ett sådant dokument ska innehålla de uppgifter som en tillverkare behöver för att kunna bedöma, dimensionera och offerera transformatorn. Det kan exempelvis omfatta

primär- och sekundärspänning, nominell effekt, primär- och sekundärström, frekvens, vektorgrupp, kylmetod, front-end-typ, pulstal, kortslutningsimpedans, installationsmiljö och eventuella särskilda krav från nät eller omriktare. Ju mer komplett och tydligt detta underlag är, desto mindre risk finns för missförstånd mellan beställare och tillverkare.

I detta examensarbete har transformatorn därför behandlats som en integrerad del av dimensioneringsprocessen, snarare än som en separat komponent som väljs efteråt. I det utvecklade Excel-baserade verktyget genereras transformatorns parametrar utifrån systemets indata och, i förekommande fall, den valda omriktaren. Verktyget ska kunna beräkna primär- och sekundärström, bestämma erforderlig skenbar effekt, hantera val av vektorgrupp och kylmetod samt sammanställa dessa data i ett inquiry data sheet. Detta gör att transformatorbehovet kan bedömas på ett mer systematiskt sätt redan i ett tidigt projekt- eller offertskede.

En viktig funktion i verktyget är jämförelsen mellan beräknad transformator och en databas över standardtransformatorer. Om de beräknade parametrarna överensstämmer med ett standardalternativ kan verktyget presentera detta som en möjlig lösning. Om ingen matchning finns klassificeras transformatorn som specialbyggd och inquiry data sheet används som underlag för vidare dialog med tillverkare. Denna funktion är viktig eftersom den kopplar samman teknisk dimensionering med praktiska projektbeslut. Det gör det möjligt att tidigt identifiera om en lösning sannolikt blir enkel att upphandla eller om den kräver mer omfattande projektering.

Integrationen av transformatorn i dimensioneringsverktyget förbättrar också spårbarheten i beslutsprocessen. I stället för att transformatorn väljs genom separat manuell bedömning kan användaren se hur transformatorbehovet följer av motorlast, nätspänning, omriktartyp och front-end-konfiguration. Detta minskar risken för att viktiga beroenden förbises. Exempelvis kan valet av diode front end med ett visst pulstal direkt påverka vilka sekundärlindningar och fasförskjutningar som krävs, medan en active front end kan innebära andra krav på transformator och nätinteraktion. Genom att dessa samband byggs in i verktyget blir dimensioneringsprocessen mer konsekvent.

Ur ett ingenjörsmässigt perspektiv är detta särskilt värdefullt eftersom MV-drivsystem ofta utformas i flera steg och av flera aktörer. Säljingenjörer, systemingenjörer, transformatorleverantörer och slutkund kan alla behöva förstå vilka krav som gäller och varför. Ett tydligt transformator förfrågningsunderlag fungerar då som ett gemensamt tekniskt språk mellan parterna. Det reducerar risken för att information tappas bort, tolkas olika eller behöver tas fram på nytt senare i projektet.

Det är samtidigt viktigt att betona att verktygets transformatorberäkning inte ersätter tillverkarens slutliga konstruktion eller verifiering. En transformatorleverantör måste fortfarande bedöma termisk dimensionering, isolationsnivåer, mekanisk konstruktion, kortslutningshållfasthet och detaljerad tillverkningsbarhet. Verktygets roll är i stället att ta fram ett kvalificerat och strukturerat förfrågningsunderlag som bygger på de

dimensioneringsdata som finns tillgängliga i ett tidigt skede. På så sätt blir verktyget ett stöd för att komma snabbare och mer korrekt fram till nästa tekniska steg.

2.6 Kortslutningsnivå och nätpåverkan

Kortslutningsnivån i ett elektriskt nät är en central parameter vid dimensionering och analys av mellanspänningsdrivsystem, eftersom den beskriver hur mycket ström nätet teoretiskt kan leverera vid ett fel. Samtidigt fungerar kortslutningsnivån som ett praktiskt mått på nätets elektriska styrka. Ett nät med hög kortslutningsnivå har låg intern impedans och kan därför hålla spänningen relativt stabil även när stora laster kopplas in eller när snabba strömförändringar uppstår. Ett nät med låg kortslutningsnivå har däremot högre impedans och blir mer känsligt för belastningsvariationer, spänningsfall, övertoner och andra störningar. För mellanspänningsomriktare är detta särskilt viktigt, eftersom dessa system är kraftelektroniska laster som kan påverka nätet på ett mer komplext sätt än traditionella passiva laster.

Kortslutningsnivån kan uttryckas antingen som kortslutningsström I_{sc} eller som kortslutningseffekt S_{sc}, där sambandet ges av:

$$S_{sc} = \sqrt{3} * U * I_{sc} \tag{2.9}$$

där U är nätets linjespänning. Om kortslutningsströmmen anges i kA och spänningen i kV erhålls kortslutningseffekten vanligtvis i MVA. I industriella anläggningar kan kortslutningsnivån variera kraftigt beroende på var i nätet anslutningspunkten befinner sig. Nära en stor transformatorstation, generator eller stark matning är kortslutningsnivån ofta hög. Längre ut i distributionsnätet, eller i anläggningar med långa kablar och hög nätimpedans, blir kortslutningsnivån lägre. Detta innebär att samma omriktare kan bete sig olika beroende på var den installeras, även om motoreffekt och spänningsnivå är desamma.

Nätets kortslutningsnivå bestäms i praktiken av den totala impedansen mellan matande källa och anslutningspunkt. Ju lägre impedansen är, desto högre blir den möjliga kortslutningsströmmen. Detta innebär att transformatorer, kablar, ledningar, reaktorer och generatorimpedanser alla påverkar kortslutningsnivån. En transformator med hög kortslutningsspänning begränsar exempelvis kortslutningsströmmen mer än en transformator med låg kortslutningsspänning. På samma sätt bidrar långa kablar och ledningar till ökad impedans och därmed lägre kortslutningsnivå. Kortslutningsnivån är därför inte en fristående egenskap hos nätet, utan ett resultat av hela matningssystemets uppbyggnad.

I dimensionering används ofta begreppen starkt och svagt nät. Ett starkt nät kännetecknas av att kortslutningseffekten är hög i förhållande till den anslutna lasten. I ett sådant nät ger en stor motor eller omriktare relativt liten påverkan på nätspänningen. Spänningsdippar, flimmer och övertonsspänningar blir normalt mindre eftersom nätets låga impedans dämpar effekten av störströmmar. Ett svagt nät har däremot låg kortslutningsnivå i förhållande till lasten. Det innebär att samma störström ger större spänningspåverkan. En omriktare som fungerar utan

problem i ett starkt industriellt nät kan därför orsaka spänningsdistorsion, instabilitet eller otillåtna spänningsvariationer i ett svagare nät.För att beskriva relationen mellan nätets styrka och den anslutna utrustningen används ibland begreppet Short Circuit Ratio, SCR. SCR kan förenklat beskrivas som kvoten mellan kortslutningseffekten i anslutningspunkten och den anslutna utrustningens märkeffekt. Ett högt SCR-värde innebär att nätet är starkt i förhållande till lasten, medan ett lågt SCR-värde indikerar att lasten utgör en stor andel av nätets kapacitet. I praktiken innebär ett lågt SCR att större försiktighet krävs vid val av omriktare, transformator, filter och inmatningslösning. Detta är särskilt relevant för stora MV-drivsystem, där omriktarens effekt kan vara betydande i förhållande till det lokala nätets kapacitet.

Kortslutningsnivån har också betydelse för hur omriktaren påverkar nätet under normal drift. Omriktare med diode front end drar inte sinusformad ström från nätet, utan strömmen tas upp i pulser kopplade till likriktarens arbetssätt. Detta ger upphov till övertoner, vilket kan orsaka spänningsdistorsion i nätet. Hur stor spänningsdistorsionen blir beror inte bara på omriktarens strömform, utan även på nätets impedans. I ett starkt nät med låg impedans blir spänningsdistorsionen ofta begränsad, medan samma övertonsström i ett svagt nät kan ge betydligt större påverkan på spänningsformen. Detta innebär att övertoner inte kan bedömas enbart utifrån omriktaren, utan måste analyseras i relation till nätets styrka.

I diode front end-system används ofta multipulslösningar för att minska övertonsinnehållet. Exempelvis kan 12-, 24- eller 36-puls inmatning användas, där transformatorn skapar olika fasskift mellan sekundärlindningarna. Genom dessa fasskift kan vissa övertonskomponenter reduceras innan de når nätet. Transformatorns uppbyggnad blir därför direkt kopplad till nätpåverkan. Val av vektorgrupp, antal sekundärlindningar och pulstal påverkar inte bara transformatorns konstruktion, utan även systemets harmoniska egenskaper. I ett starkt nät kan enklare lösningar ibland vara tillräckliga, medan ett svagt nät kan kräva mer avancerad övertonsdämpning eller kompletterande filter.

I system med active front end ser nätinteraktionen annorlunda ut. Eftersom en active front end använder styrbara halvledarkomponenter kan nätströmmen regleras aktivt. Detta gör det möjligt att uppnå bättre effektfaktor, lägre övertonsinnehåll och i vissa fall regenerativ drift, där energi återförs till nätet. Trots dessa fördelar innebär active front end inte att nätets egenskaper kan ignoreras. Tvärtom behöver styrsystemet anpassas till nätets impedans och dynamik. I svaga nät kan interaktionen mellan aktiv styrning, filter och nätimpedans leda till resonanser eller stabilitetsproblem om systemet inte dimensioneras korrekt. Därför är kortslutningsnivån relevant även för mer avancerade omriktartopologier.

Kortslutningsnivån påverkar även dimensioneringen av skydd och inmatningsutrustning. Vid ett fel måste brytare, kontaktorer, ställverk och andra komponenter kunna tåla och bryta den kortslutningsström som kan uppstå. Om kortslutningsnivån är hög krävs utrustning med tillräcklig brytförmåga och korttidsströmtålighet. Detta är både en säkerhetsfråga och en kravfråga vid val av switchgear. Om utrustningen inte är dimensionerad för den aktuella kortslutningsnivån kan ett fel leda till allvarliga skador på anläggningen. Samtidigt kan en låg kortslutningsnivå skapa andra problem. Om felströmmen blir för låg kan skyddssystemet få

svårare att detektera felet snabbt och selektivt. Därför måste både höga och låga kortslutningsnivåer beaktas i dimensioneringsprocessen.

Det är också viktigt att skilja mellan kortslutningsnivån i nätet och utrustningens kortslutningsklassning. Begreppet SCCR, Short-Circuit Current Rating, beskriver vilken kortslutningsström en utrustning eller ett system är konstruerat för att tåla under specificerade förhållanden. Om nätets möjliga kortslutningsström överstiger utrustningens SCCR kan utrustningen inte anses korrekt dimensionerad för installationen utan ytterligare skyddsåtgärder. I ett dimensioneringsverktyg är det därför viktigt att tydligt definiera om användaren ska ange nätets kortslutningsström, kortslutningseffekt eller utrustningens SCCR, eftersom dessa begrepp har olika betydelse trots att de alla relaterar till kortslutning.

Transformatorn har en särskilt viktig roll i detta sammanhang. Den påverkar både spänningsnivå, galvanisk separation, impedans och kortslutningsström på sekundärsidan. En transformator med högre impedans begränsar kortslutningsströmmen mer, vilket kan vara fördelaktigt för att minska felströmmar och skyddskrav på nedströms utrustning. Samtidigt leder högre impedans till större spänningsfall vid belastning, vilket kan påverka omriktarens tillgängliga inspänning och därmed dess driftmarginaler. Transformatorns impedans blir därför en avvägning mellan att begränsa felströmmar, hålla spänningen stabil och möjliggöra tillräcklig effektöverföring under drift.

Kortslutningsnivån har även betydelse för start- och transientförlopp. Även om en frekvensomriktare normalt möjliggör mjukare start än direktstartade motorer kan stora drivsystem fortfarande ge upphov till temporära spänningsvariationer vid inkoppling, laddning av DC-länk, förändring av last eller övergång mellan driftlägen. I ett starkt nät dämpas dessa variationer bättre, medan ett svagt nät kan uppvisa märkbara spänningsdippar eller svängningar. För känsliga industriella processer kan sådana variationer påverka annan utrustning i anläggningen. Detta gör att nätstyrka inte bara är relevant vid fel, utan även vid normal drift och övergångsförlopp.

I industriella anläggningar där flera stora omriktare eller andra kraftelektroniska system är anslutna till samma nät blir frågan ännu mer komplex. Varje enskild omriktare kan bidra med övertoner och dynamisk påverkan, men den totala nätpåverkan bestäms av summan av alla anslutna laster och deras interaktion med nätimpedansen. Detta innebär att dimensionering av en ny MV-omriktare bör göras med kännedom om övrig utrustning i anläggningen. Ett verktyg för preliminär dimensionering kan inte ersätta en fullständig nätstudie, men det kan bidra till att tidigt identifiera när en sådan studie är nödvändig.

I det utvecklade Excel-baserade dimensioneringsverktyget används kortslutningsnivån som en indata för att ge en första indikation på nätets styrka. Verktyget genomför inte en fullständig kortslutningsberäkning eller harmonisk nätanalys, men genom att inkludera kortslutningsnivån kan användaren redan i ett tidigt skede uppmärksammas på om den aktuella anslutningspunkten är stark eller svag i förhållande till den planerade omriktarlasten. Detta kan påverka flera efterföljande val i verktyget, exempelvis val av front-end-topologi,

behov av multipulstransformator, krav på filter eller reaktorer samt bedömning av transformatorns impedans.

Att inkludera kortslutningsnivån i verktyget bidrar också till en tydligare koppling mellan komponentdimensionering och systemintegration. Ett omriktarval kan framstå som korrekt utifrån motoreffekt, spänning och ström, men ändå vara olämpligt om nätet är för svagt eller om kortslutningsnivån ställer särskilda krav på inmatningsutrustningen. Genom att kortslutningsnivån finns med i den tidiga dimensioneringen minskar risken att sådana problem upptäcks först senare i projektet, då ändringar ofta blir mer kostsamma.

Ur ett ingenjörsmässigt perspektiv är detta en viktig princip. Dimensionering av ett MV-drivsystem handlar inte enbart om att välja komponenter som var för sig klarar sina märkdata. Systemet måste även fungera i sitt elektriska sammanhang. Kortslutningsnivån är därför en parameter som binder samman nätets egenskaper, skyddsutrustningens krav, transformatorns impedans och omriktarens nätpåverkan. Genom att behandla denna parameter redan i dimensioneringsverktyget skapas en mer realistisk och ansvarstagande arbetsprocess, där preliminära val kan göras med bättre förståelse för hela systemets förutsättningar.

3. Metod

3.1 Övergripande arbetsmetod

Arbetet har genomförts som ett tillämpat ingenjörsprojekt där målet har varit att utveckla ett praktiskt och tekniskt spårbart dimensioneringsverktyg för mellanspänningsdrivsystem. Eftersom verktyget är avsett att användas i tidiga projekt- och offertskeden har metodiken behövt kombinera elektrotekniska beräkningar med ett tydligt industriellt användarperspektiv. Det har därför inte varit tillräckligt att enbart ta fram enskilda formler för ström, effekt och transformatorstorlek. Arbetet har i stället handlat om att strukturera en hel dimensioneringsprocess så att användaren stegvis kan gå från indata till tekniskt motiverade resultat.

Metoden har utformats iterativt. En första struktur för verktyget togs fram i Excel och vidareutvecklades därefter utifrån tekniska behov och återkoppling från Innomotics. Den iterativa arbetsformen var nödvändig eftersom flera delar av dimensioneringsprocessen inte kunde definieras fullständigt i början av arbetet. Exempelvis behövde det klargöras hur kortslutningsnivå skulle anges, hur olika transformatorparametrar skulle presenteras, hur en vald omriktare skulle kopplas till transformatorberäkningen och hur verktyget skulle skilja mellan standardtransformator och specialbyggd transformator.

Arbetsmetoden kan sammanfattas i sex huvudsteg: kravinsamling, strukturering av verktygets arbetsflöde, uppbyggnad av databaser, implementering av beräkningslogik, framtagning av resultat- och förfrågningsunderlag samt verifiering genom rimlighetskontroller. Genom denna arbetsgång har verktyget utvecklats från en grundläggande beräkningsmodell till ett mer heltäckande beslutsstöd för dimensionering av omriktare och transformatorlösning.

3.2 Kravinsamling och analys av dimensioneringsbehov

Det första steget bestod i att identifiera vilka funktioner verktyget behövde innehålla och vilka tekniska frågor det skulle kunna besvara. Kravinsamlingen byggde på projektbeskrivningen från Innomotics, diskussioner med företagets representanter och återkoppling på tidigare versioner av Excel-verktyget. Fokus låg på att förstå hur dimensionering av mellanspänningsomriktare och tillhörande transformatorer genomförs i praktiken, samt vilka delar som behöver göras mer strukturerade och mindre personberoende.

Under kravinsamlingen framkom att verktyget behövde hantera två huvudsakliga arbetssätt. Det första arbetssättet utgår från att användaren matar in motor- och nätdata och därefter låter verktyget föreslå eller kontrollera en lämplig omriktare. Det andra arbetssättet utgår från att omriktaren redan är känd. I detta fall ska verktyget kunna använda den valda omriktarens tekniska data för att direkt ta fram transformatorberäkning och ett förfrågnignsunderlag. Detta är viktigt eftersom ett verkligt projekt inte alltid börjar med ett fritt omriktarval; ofta finns redan en tänkt omriktarplattform eller produktfamilj som ska användas.

Kravinsamlingen visade också att flera indata måste definieras tydligt för att verktyget ska bli tillförlitligt. Exempel på sådana indata är nätspänning, nätfrekvens, kortslutningsnivå, motoreffekt, motorspänning, effektfaktor, verkningsgrad, driftfrekvens, applikationstyp, front-end-typ, pulstal, transformatorns primär- och sekundärspänning, vektorgrupp, kylmetod och designmarginaler. För varje sådan parameter behövde enhet och tolkning göras tydlig, eftersom fel indata riskerar att ge felaktiga resultat i hela beräkningskedjan.

3.3 Verktygets övergripande struktur

Efter kravinsamlingen utformades verktyget med en modulär Excel-struktur. Syftet med denna struktur var att separera användarens inmatning, tekniska databaser, beräkningar och resultat. Detta minskar risken för felaktig användning och gör det lättare att granska hur resultaten uppstår. Den senaste versionen av verktyget består av sju huvudflikar: "**INPUT, DATABASE**, **CALC_DRIVE**, **CALC_TRAFO**, **DRIVE_CURVES**, **RESULTS** och **TRAFO_INQUIRY**".

Fliken **INPUT** fungerar som användarens huvudsakliga gränssnitt. Här anges de parametrar som styr dimensioneringen, exempelvis nätspänning, frekvens, kortslutningsnivå, motoreffekt, motorspänning, effektfaktor, verkningsgrad, applikationstyp, driftfrekvens, val av omriktarläge, vald omriktare, front-end-typ, pulstal, transformatorparametrar och designmarginaler. Genom att samla alla användarstyrda värden i en separat flik blir det tydligt vilka data som matas in manuellt och vilka värden som senare beräknas automatiskt.

Fliken **DATABASE** innehåller den tekniska information som används av beräkningsflikarna. Här samlas data för GH180-omriktare, standardtransformatorer, kabeldata, deratingtabeller och frekvensberoende driftdata. Databasen fungerar därmed som verktygets tekniska underlag och gör det möjligt att koppla användarens indata till verkliga produkt- och standardvärden.

Flikarna **CALC_DRIVE** och **CALC_TRAFO** innehåller beräkningslogiken. **CALC_DRIVE** hanterar beräkning av motorström, designström, derating, omriktarval, frekvensberoende strömkontroll och kontroll mot vald omriktare. **CALC_TRAFO** använder därefter resultat från omriktarberäkningen och indata från användaren för att beräkna transformatorns krav, exempelvis primär- och sekundärström, märkeffekt, spänningsnivåer och klassificering som standard- eller specialtransformator.

Fliken **DRIVE_CURVES** används för att representera omriktarens frekvensberoende drift. Här visas hur tillgänglig ström, moment och effekt varierar över frekvensområdet. Denna del är viktig eftersom omriktaren inte enbart ska bedömas vid en nominell driftpunkt, utan även utifrån hur den klarar belastningen över ett bredare driftområde.

Fliken **RESULTS** sammanställer verktygets viktigaste resultat i en mer lättläst form. Här visas vald omriktare, effekt, designström, omriktarstatus, transformatorstatus och eventuella varningar. Slutligen används fliken **TRAFO_INQUIRY** för att generera ett tekniskt förfrågningsunderlag vid kontakt med transformatorleverantör.

3.4 Modellering av omriktarberäkning

Omriktarberäkningen bygger på att användarens motor- och nätdata först omvandlas till dimensionerande elektriska storheter. Motoreffekt, motorspänning, effektfaktor och verkningsgrad används för att beräkna motorns nominella ström. Därefter appliceras säkerhetsmarginaler och eventuella deratingfaktorer för att få fram en dimensionerande designström.

Denna designström används sedan som grund för att kontrollera om vald eller föreslagen omriktare är tekniskt lämplig. Verktyget jämför bland annat motorns och systemets krav mot omriktarens märkdata, exempelvis maximal effekt, spänningsområde och märkström. I den senaste versionen finns även stöd för ett arbetsläge där användaren kan ange en redan känd omriktare. Detta innebär att verktyget inte alltid behöver söka fram en omriktare från början, utan kan använda en vald GH180-modell som utgångspunkt för vidare beräkningar.

En viktig del av metoden är att omriktaren inte endast kontrolleras mot nominella värden. Eftersom omriktarens strömkapacitet kan variera med frekvens och driftförhållanden används även frekvensberoende data. Därför kopplas **CALC_DRIVE** till **DRIVE_CURVES**, där tillgänglig ström, effekt och moment visas över ett definierat frekvensområde. På så sätt kan verktyget identifiera om designströmmen ligger inom omriktarens tillåtna driftområde vid aktuell driftfrekvens.

3.5 Modellering av transformatorberäkning

Transformatorberäkningen har modellerats som en direkt fortsättning på omriktarberäkningen. När omriktarens krav är kända används dessa för att bestämma transformatorns elektriska specifikationer. I **CALC_TRAFO** beräknas bland annat erforderlig skenbar effekt, primärström, sekundärström och designvärden med marginal. Beräkningarna baseras på nätets primärspänning, omriktarens sekundärspänningskrav, frekvens, effektbehov och dimensionerande ström.

En viktig metodisk princip är att transformatorn inte behandlas som en separat komponent som väljs efteråt, utan som en integrerad del av drivsystemet. Detta är särskilt viktigt eftersom valet av front-end-typ och pulstal kan påverka transformatorns utformning. En diode front end-lösning kan till exempel kräva multipulstransformator med specifika sekundärlindningar och fasförskjutningar, medan en active front end-lösning kan ställa andra krav.

Verktyget tar även hänsyn till parametrar som vektorgrupp och kylmetod. Dessa värden hämtas från användarens indata och förs vidare till transformatorberäkningen och förfrågningsunderlaget. Därmed skapas en tydlig koppling mellan systemkrav, elektriska beräkningar och den information som senare behöver kommuniceras till en transformatorleverantör.

3.6 Standardtransformator eller specialtransformator

En central del av metoden är att den beräknade transformatorn jämförs med en databas över standardtransformatorer. Syftet är att avgöra om transformatorbehovet kan uppfyllas av ett befintligt standardalternativ eller om en specialbyggd transformator krävs. Denna jämförelse görs genom att verktyget kontrollerar om parametrar som effekt, primärspänning, sekundärspänning, ström, vektorgrupp och kylmetod överensstämmer med definierade standardalternativ.

Om en matchning finns klassificeras transformatorn som en standardtransformator och verktyget kan presentera detta som ett möjligt alternativ. Om ingen matchning finns klassificeras den som specialtransformator.

3.7 Implementering av förfrågningsunderlag för transformator

Fliken **TRAFO_INQUIRY** har utvecklats för att översätta beräkningsresultaten till ett tekniskt förfrågningsunderlag. Här sammanställs de viktigaste transformatorparametrarna, exempelvis märkeffekt, primärspänning, sekundärspänning, primärström, sekundärström, frekvens, vektorgrupp, kylmetod, front-end-typ, pulstal och annan relevant systeminformation. Underlaget bygger på de beräkningar som görs i **CALC_TRAFO** och uppdateras automatiskt när indata ändras.

Metodiskt är detta viktigt eftersom ett dimensioneringsverktyg inte enbart ska ge interna beräkningsresultat, utan också kunna producera ett användbart tekniskt dokument. Förfrågningsunderlaget fungerar därför som gränssnittet mellan verktygets beräkningslogik och den externa leverantörsprocessen. Det gör att resultatet kan användas mer direkt i praktiskt ingenjörsarbete, exempelvis vid offertförfrågan för en specialtransformator.

3.8 Verifiering och rimlighetskontroll

För att säkerställa att verktyget ger rimliga resultat har beräkningar och logik kontrollerats genom flera typer av rimlighetskontroller. Grundläggande elektriska samband, såsom beräkning av trefasström och skenbar effekt, har kontrollerats mot handberäkningar. Detta är särskilt viktigt eftersom fel i dessa tidiga beräkningssteg skulle påverka både omriktarval, transformatorberäkning och kabelrelaterade kontroller.

Utöver kontroll av enskilda formler har verktygets beteende granskats genom att ändra indata och analysera om resultatet förändras på ett tekniskt rimligt sätt. En ökning av motoreffekt ska exempelvis ge högre ström och därmed kunna påverka valet av omriktare och transformator. En ändrad spänningsnivå ska påverka strömmen enligt trefassambandet. Om en vald omriktare har för låg märkström ska verktyget kunna indikera detta genom statusmeddelanden. På samma sätt ska verktyget kunna visa om en transformator inte matchar standarddatabasen och därför behöver behandlas som specialbyggd.

Verifieringen har även omfattat kontroll av verktygets användbarhet. Detta innebär att resultat- och inquiry-flikarna har granskats utifrån om de ger tillräckligt tydlig information för en användare att förstå nästa steg. Ett viktigt krav har varit att verktyget inte enbart visar att något är fel, utan även ger en indikation på varför, exempelvis om designströmmen överskrider vald omriktares märkström eller om ingen standardtransformator hittas.

Det bör samtidigt betonas att verifieringen i detta arbete är begränsad till den nivå som är rimlig inom ramen för ett examensarbete. En fullständig verifiering skulle kräva fler verkliga projektfall, tillgång till tillverkarens interna konfigurationsmodeller samt extern återkoppling från transformatorleverantörer. Verktyget bör därför betraktas som en prototyp och ett beslutsstöd för tidiga projektskeden, inte som ett slutgiltigt kommersiellt dimensioneringssystem.

3.9 Metodens begränsningar

Den valda metoden har vissa begränsningar. Eftersom verktyget är implementerat i Excel är det inte avsett för avancerade dynamiska simuleringar, detaljerad harmonikanalys, fullständig skyddsselektivitet eller elektromagnetisk modellering. Verktyget bygger i stället på förenklade men tekniskt motiverade beräkningar som är anpassade för tidig dimensionering.

En annan begränsning är att resultatets tillförlitlighet är beroende av kvaliteten på databaserna. Om produktdata, transformatorstandarder, kabeldata eller deratingtabeller är ofullständiga kommer även verktygets resultat att påverkas. För att verktyget ska kunna användas i praktiken behöver databaserna därför uppdateras och kvalitetssäkras kontinuerligt.

Metoden bygger också på att vissa komplexa samband förenklas. Exempelvis ger verktyget en indikation på nätets styrka genom kortslutningsnivå, men det genomför inte en fullständig nätstudie. På samma sätt kan verktyget indikera behov av specialtransformator, men det ersätter inte transformatorleverantörens slutliga konstruktion och verifiering. Trots dessa begränsningar är metoden lämplig för arbetets syfte, eftersom den skapar ett strukturerat, transparent och praktiskt användbart beslutsstöd för tidig dimensionering av mellanspänningsdrivsystem.

4. Resultat och systembeskrivning

4.1 Översikt av det utvecklade verktyget

Resultatet av arbetet är ett Excel-baserat dimensioneringsverktyg för mellanspänningsdrivsystem, med fokus på val av mellanspänningsomriktare och framtagning av transformatorunderlag. Verktyget är utvecklat för att kunna användas i ett tidigt projekt- eller offertskede, där det ofta finns behov av att snabbt bedöma om en viss systemlösning är tekniskt rimlig.

Verktyget är uppbyggt modulärt och består av flera separata flikar med olika funktioner. Denna struktur har valts för att tydligt skilja mellan användarens indata, tekniska databaser, beräkningslogik och resultatpresentation. I den senaste versionen består verktyget av flikar såsom **INPUT**, **DATABASE**, **CALC_DRIVE**, **CALC_TRAFO**, **DRIVE_CURVES**, **RESULTS** och **TRAFO_INQUIRY**. Varje flik har en specifik roll i dimensioneringsprocessen och bidrar till att göra beräkningarna mer spårbara.

Det övergripande arbetsflödet börjar med att användaren anger relevanta systemdata i INPUT-fliken. Dessa data omfattar bland annat nätdata, motordata, driftförhållanden, omriktarrelaterade val och transformatorparametrar. Därefter används databaserna för att jämföra användarens krav med tillgängliga omriktare, standardtransformatorer och andra tekniska alternativ. Beräkningsflikarna behandlar sedan data stegvis och genererar resultat som presenteras i RESULTS-fliken samt, vid behov, i ett separat förfrågningsunderlag för transformator.

En viktig funktion i verktyget är att det stödjer två olika användningsfall. I det första fallet används motor- och nätdata för att beräkna dimensionerande ström och välja eller kontrollera en lämplig omriktare. I det andra fallet kan användaren utgå från en redan känd omriktare och direkt generera transformatorberäkning och förfrågningsunderlag. Detta är viktigt eftersom verkliga projekt inte alltid börjar från ett öppet val av omriktare. I många fall finns redan en tänkt produktfamilj eller en specifik omriktare, och då ligger fokus på att ta fram korrekt transformatorunderlag.

Det utvecklade verktyget bidrar därmed till att samla flera moment som annars riskerar att hanteras separat: strömberäkning, derating, frekvensberoende kontroll, omriktarval, transformatorberäkning, standardjämförelse och generering av förfrågningsunderlag. Resultatet är ett mer sammanhållet arbetsflöde där användaren kan följa hur indata påverkar slutresultatet.

4.2 Indata och användargränssnitt

INPUT-fliken utgör verktygets primära användargränssnitt. Den är utformad för att samla de parametrar som behövs för att genomföra en preliminär dimensionering av ett

mellanspänningsdrivsystem. En viktig målsättning med denna flik har varit att göra inmatningen tydlig och minska risken för feltolkning. Eftersom verktygets resultat är direkt beroende av kvaliteten på indata är det avgörande att användaren förstår både vilken parameter som ska anges och i vilken enhet den ska matas in.

Indata kan delas in i flera huvudkategorier. Den första kategorin är nätdata, där användaren anger exempelvis nätspänning, frekvens och kortslutningsnivå. Kortslutningsnivån är särskilt viktig eftersom den ger en indikation på nätets styrka och därmed kan påverka bedömningen av nätpåverkan, front-end-val och behov av ytterligare komponenter såsom filter eller reaktorer. Eftersom kortslutningsnivå kan uttryckas både som kortslutningsström och kortslutningseffekt behöver verktyget vara tydligt med vilken storhet som används. Detta minskar risken för att fel typ av värde matas in.

Den andra kategorin är motordata. Här anges bland annat motoreffekt, motorspänning, effektfaktor och verkningsgrad. Dessa parametrar används för att beräkna den grundläggande lastströmmen, vilken sedan används i efterföljande dimensioneringssteg. Motordata är därför en av de viktigaste delarna av INPUT-fliken. Om motoreffekten, spänningen eller effektfaktorn anges fel kommer även omriktar- och transformatorberäkningen att påverkas.

Den tredje kategorin är drift- och applikationsrelaterade data. Här ingår exempelvis driftfrekvens, applikationstyp, driftfall och eventuella designmarginaler. Dessa parametrar är viktiga eftersom en omriktare inte enbart ska klara nominell drift, utan även de driftpunkter där belastningen kan bli mest krävande. Designmarginalen används för att ge systemet en viss robusthet, men behöver hanteras tydligt så att verktyget inte blir onödigt konservativt.

Den fjärde kategorin är omriktar- och transformatorrelaterade val. Här kan användaren exempelvis ange om omriktaren redan är känd, vilken omriktare som ska användas, vilken front-end-typ systemet har, vilket pulstal som är aktuellt samt vilka transformatorparametrar som önskas. Exempel på sådana parametrar är vektorgrupp, kylmetod, primärspänning och sekundärspänning. Genom att dessa värden anges i INPUT-fliken kan de automatiskt föras vidare till beräkningsflikar och förfrågningsunderlag.



MV-Drives Dimensioning Tool · Innomotics

Perfect Harmony GH180 · Engineering Decision-Support · v6.0

Yellow = enter value ▼ = dropdown (click cell) Gray = auto-calculated Red corner = tooltip (hover)

① GRID DATA

Grid Voltage	22	kV	▼ Choose from dropdown Common: 3.3 / 6.6 / 10 / 11 / 33 kV
Grid Frequency	50	Hz	▼ Choose from dropdown 50 Hz (EU/Asia) | 60 Hz (Americas)
Short-Circuit Level	20	kA	Grid fault current — typical range: 6–100 kA
Short-Circuit Power (Scc) [ref only]	762,1023553	MVA	Auto-calculated from isc and grid voltage

② MOTOR / LOAD DATA

Required Motor Power	1,5	MW	Shaft power at rated operating point
Motor Efficiency (η)	96	%	Typical IE3: 94–97 %
Motor Power Factor (cosφ)	0,85	–	Typical MV motor: 0.80–0.90
Motor Nominal Voltage	3,3	kV	▼ Choose from dropdown Must match drive output voltage
Application Type	Pump	–	▼ Choose from dropdown
Operating Mode	Continuous	–	▼ Choose from dropdown
Operating Frequency (f_op)	20	Hz	Speed at rated point — for I-f curve check

③ CONVERTER SELECTION MODE

Input Mode	Converter-Known	–	▼ Choose from dropdown Motor-Based = calculate from motor data | Converter-
Known Converter Model (if Converter-Known)	GH180 – 6SR5 375A (15 cells)	–	▼ Choose from dropdown Only active when Input Mode = Converter-Known

ℹ Converter-Known mode: select the GH180 model above → tool retrieves rated current & power → directly generates transformer specification without motor calculations.

④ TRANSFORMER INPUTS (external sourcing — fully customizable)

Transformer Primary Voltage	22	kV	Auto-linked from Grid Voltage
Transformer Secondary Voltage	3,3	kV	Auto-linked from Motor Voltage
Transformer Frequency	50	Hz	Auto-linked from Grid Frequency
Vector Group	Dyn11	–	▼ Choose from dropdown
Target Impedance (%uk)	6	%	Typical 5–8 % for MV transformers
Cooling Type	ONAN	–	▼ Choose from dropdown
Front-End Type	AFE	–	▼ Choose from dropdown AFE=Active Front End | DFE=Diode Front End
Pulse Configuration (DFE only)	12-pulse	–	▼ Choose from dropdown 12-pulse=2 windings | 24-pulse=4 | 36-pulse=6
IP-protection rating	IP33	–	▼ Choose from dropdown

⑤ INSTALLATION

Cable Length (Drive → Motor)	50	m	Single-way distance
Ambient Temperature	40	°C	Max expected at drive / cable route
Altitude	0	m	Metres above sea level — affects drive derating
Cable Material	Copper	–	▼ Choose from dropdown
Cable Installation Method	Trefoil – Direct buried	–	▼ Choose from dropdown

⑥ DESIGN MARGINS

ℹ Margins are applied AFTER base calculations (not to the input values). They apply uniformly to Drive, Transformer, and Cable sizing. Recommended: 10–20% current margin, 10% power margin.

Current Safety Margin	10	%	Applied after I_motor is calculated (not to input)
Power Safety Margin	10	%	Applied after P_required is calculated

ℹ Change any yellow cell → all sheets update automatically → RESULTS for summary → TRAFO_INQUIRY for printable transformer specification.

Figur [4.2]: Översikt av verktygets indataflik, där användaren matar in tekniska grunddata för nät, motor, omriktare, transformator och installation. Dessa indata ligger till grund för efterföljande beräkningar och urval i dimensioneringsverktyget.

För att förbättra användarvänligheten bör flera av fälten i INPUT-fliken hanteras med fördefinierade val, exempelvis dropdown-listor. Detta är särskilt relevant för parametrar såsom front-end-typ, vektorgrupp, kylmetod och pulstal. Genom att begränsa användaren till definierade val minskar risken för stavfel, formatfel och inkonsekvent användning. Det gör också att verktyget blir lättare att använda av personer som inte har varit med och utvecklat det.

Sammantaget fungerar INPUT-fliken som grunden för hela verktyget. Den är inte bara en plats där användaren matar in värden, utan även ett sätt att strukturera problemformuleringen.

Genom att samla alla relevanta systemdata på ett ställe blir dimensioneringsprocessen mer överskådlig och lättare att följa.

4.3 Databaser och teknisk information

DATABASE-fliken fungerar som verktygets tekniska kunskapsbas. Här samlas den information som krävs för att verktyget ska kunna jämföra användarens krav med tillgängliga komponenter och tekniska alternativ. Databasen är central eftersom verktygets resultat inte enbart bygger på formler, utan också på produktdata och definierade standardvärden.

En del av databasen utgörs av omriktardata. Här lagras information om tillgängliga omriktare, exempelvis modellnamn, spänningsområde, märkeffekt, märkström, front-end-typ och eventuella tekniska begränsningar. Eftersom arbetet är kopplat till Innomotics och GH180-plattformen är det särskilt viktigt att databasen kan hantera produktspecifika parametrar för denna typ av MV-omriktare. Omriktardatabasen används senare i CALC_DRIVE för att kontrollera om en vald eller föreslagen omriktare klarar systemets krav.

En annan viktig del är databasen för standardtransformatorer. Den används för att avgöra om den framräknade transformatorn motsvarar en befintlig standardlösning eller om en specialbyggd transformator behöver specificeras. För att denna jämförelse ska vara meningsfull behöver standardtransformatorerna definieras med relevanta parametrar, exempelvis märkeffekt, primärspänning, sekundärspänning, frekvens, vektorgrupp och kylmetod. Om databasen är för förenklad riskerar verktyget att felaktigt klassificera en transformator som standard eller special.

Databasen innehåller även kabeldata och eventuella deratingtabeller. Kabeldata kan exempelvis omfatta ledarmaterial, resistans, reaktans och tillåten ström. Det är viktigt att tydligt skilja mellan koppar- och aluminiumledare, eftersom dessa har olika elektriska egenskaper. Deratingtabeller används för att justera komponenternas tillåtna belastning utifrån driftförhållanden såsom temperatur, kylning eller installationsmiljö.

En fördel med att samla denna information i en separat databasflik är att verktyget blir mer underhållbart. Om produktdata ändras, om nya omriktare tillkommer eller om standardtransformatorlistan uppdateras kan detta göras i databasen utan att hela verktygets struktur behöver ändras. Detta är viktigt om verktyget ska kunna vidareutvecklas eller användas över tid.

DATABASE-fliken är därmed inte bara ett stöd för beräkningarna, utan en central del av verktygets transparens. Genom att produktdata och standardvärden finns samlade på en definierad plats blir det tydligare vilka antaganden och begränsningar som ligger bakom resultatet.

4.4 Urval och kontroll av omriktare

Urvalet och kontrollen av omriktare sker huvudsakligen i CALC_DRIVE-fliken. Denna del av verktyget utgör en av de viktigaste funktionerna, eftersom omriktarens kapacitet påverkar både motorstyrningen och de krav som ställs på transformatorn. Beräkningen börjar med att verktyget använder motoreffekt, motorspänning, effektfaktor och verkningsgrad för att beräkna den grundläggande motorströmmen.

Den beräknade motorströmmen används sedan som utgångspunkt för vidare dimensionering. I nästa steg kan strömmen justeras med designmarginaler och deratingfaktorer för att få fram en mer realistisk designström. Detta är viktigt eftersom omriktaren inte enbart ska klara ideala nominella förhållanden, utan även verkliga driftförhållanden där temperatur, kylning, belastningsprofil eller frekvens kan påverka kapaciteten.

Verktyget kontrollerar därefter om den valda eller föreslagna omriktaren uppfyller systemets krav. Detta görs genom att jämföra designström, effektbehov och spänningsnivå med omriktarens data i databasen. Om omriktaren klarar samtliga krav kan den betraktas som tekniskt lämplig inom verktygets avgränsningar. Om något krav inte uppfylls ska verktyget kunna indikera detta genom statusmeddelanden.

En viktig förbättring i verktygets logik är att det inte enbart bör visa att ingen lämplig omriktare finns, utan även ge en indikation på varför. Ett generellt meddelande som “No suitable drive” är inte tillräckligt i ett tekniskt beslutsstöd. Användaren behöver kunna se om problemet beror på att strömmen är för hög, att spänningsnivån ligger utanför omriktarens område, att effekten överskrider kapaciteten eller att vald front-end-konfiguration inte är kompatibel. Detta gör verktyget mer användbart både för felsökning och för teknisk analys.

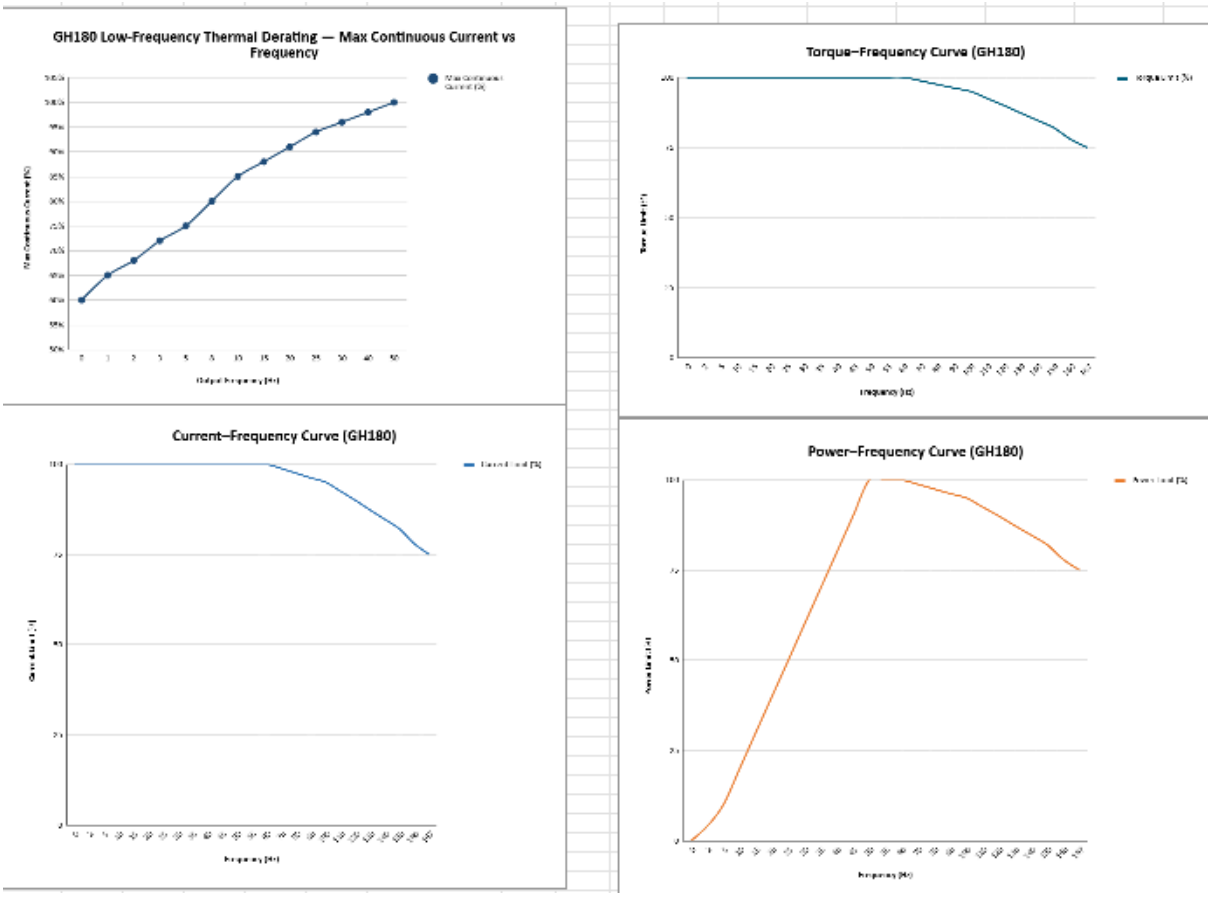
I den senaste versionen av verktyget finns även stöd för att arbeta med en redan vald omriktare. Detta innebär att användaren kan ange en specifik omriktare i INPUT-fliken, varefter verktyget använder dess data i beräkningarna. Detta är särskilt relevant i projekt där omriktarplattformen redan är bestämd och där huvuduppgiften är att dimensionera transformatorn och ta fram förfrågningsunderlag.

Omriktarberäkningen fungerar därmed både som ett urvalssteg och som ett kontrollsteg. Den kan användas för att hitta en lämplig lösning, men också för att verifiera om en redan vald lösning är rimlig utifrån systemets krav.

4.5 Frekvensberoende drift och DRIVE_CURVES

En viktig del av resultatet är att verktyget inkluderar frekvensberoende analys genom DRIVE_CURVES-fliken. Detta är en central funktion eftersom en omriktare inte bör bedömas enbart vid nominell driftpunkt. I praktiska applikationer varierar motorström, moment och effekt över frekvensområdet, och vissa driftpunkter kan vara mer krävande än den nominella punkten.

DRIVE_CURVES-fliken används för att visualisera hur omriktarens och motorns belastning förändras med frekvens. Genom att representera samband mellan frekvens, motorström, moment och effekt kan användaren få en tydligare bild av systemets driftområde. Detta gör det möjligt att identifiera driftpunkter där omriktaren kan ligga nära sin kapacitetsgräns.



Figur [4.5]: Frekvensberoende driftkurvor för GH180-omriktaren. Diagrammen visar lågfrekvensderating samt hur tillgänglig ström, moment och effekt förändras över frekvensområdet. Kurvorna används i verktyget för att kontrollera om vald omriktare har tillräcklig kapacitet vid angiven driftfrekvens.

Denna funktion är särskilt viktig i applikationer där högt moment krävs vid låg hastighet eller där systemet arbetar över ett brett frekvensområde. Vid låga frekvenser kan strömmen vara hög även om effekten inte är maximal, medan drift över basfrekvensen kan leda till att spänning eller effekt blir begränsande. Genom att visa dessa samband grafiskt blir dimensioneringsprocessen mer intuitiv och mer tekniskt förankrad.

I verktygets arbetsflöde fungerar DRIVE_CURVES som en komplettering till CALC_DRIVE. Medan CALC_DRIVE genomför numeriska kontroller kan DRIVE_CURVES ge en visuell bekräftelse på hur belastningen ser ut över frekvensområdet.

Denna kombination av beräkning och visualisering stärker verktygets användbarhet eftersom användaren inte bara får ett slutresultat, utan även kan förstå hur systemet beter sig.

4.6 Transformatorberäkning och teknisk förfrågningsunderlag

Transformatorberäkningen sker i CALC_TRAFO-fliken och bygger på både användarens indata och resultatet från omriktarberäkningen. När omriktarens krav är kända kan verktyget beräkna vilka elektriska parametrar transformatorn behöver uppfylla. Detta omfattar bland annat primärspänning, sekundärspänning, primärström, sekundärström, skenbar effekt och frekvens.

En viktig princip i verktyget är att transformatorn behandlas som en integrerad del av drivsystemet. Den väljs alltså inte som en separat komponent efteråt, utan dimensioneras utifrån omriktarens krav, nätets förutsättningar och systemets konfiguration. Detta är särskilt viktigt eftersom front-end-typ och pulstal kan påverka transformatorns utformning. En diode front end-lösning med 12-, 24- eller 36-puls kan exempelvis kräva särskilda sekundärlindningar och fasförskjutningar. En active front end-lösning kan däremot ha andra krav på transformator och nätinteraktion.

Verktyget tar även hänsyn till parametrar som vektorgrupp och kylmetod. Dessa värden är viktiga eftersom de påverkar transformatorns funktion, termiska kapacitet och anpassning till systemet. Genom att användaren anger dessa parametrar i INPUT-fliken och att de sedan förs vidare till CALC_TRAFO och TRAFO_INQUIRY skapas en tydlig koppling mellan användarens val och det tekniska förfrågningsunderlaget.

Resultatet av transformatorberäkningen sammanställs i TRAFO_INQUIRY-fliken. Denna flik fungerar som ett tekniskt förfrågningsunderlag för transformatorn och innehåller de parametrar som en transformatorleverantör behöver för att kunna bedöma eller offerera en lösning. Exempel på information som bör ingå är transformatorns märkeffekt, primär- och sekundärspänning, primär- och sekundärström, frekvens, vektorgrupp, kylmetod, front-end-typ och pulstal.

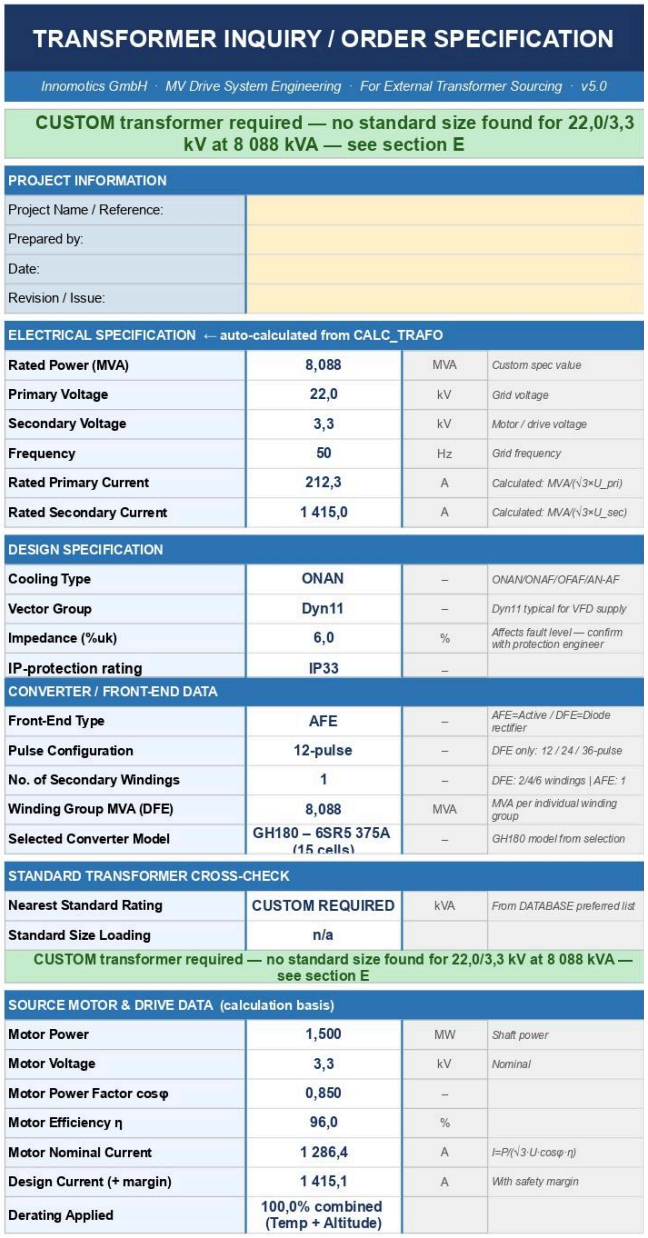
Denna funktion är en av verktygets viktigaste praktiska delar. Den gör att verktyget inte bara ger interna beräkningsresultat, utan även producerar ett tekniskt dokument som kan användas i nästa steg av projektprocessen. På så sätt kopplas dimensioneringsverktyget direkt till verkligt ingenjörsarbete och offertförberedelse.

4.7 Klassificering av standard- och specialtransformatorer

En central funktion i verktyget är att kunna avgöra om den beräknade transformatorn motsvarar en standardtransformator eller om en specialbyggd transformator behöver specificeras. Denna funktion bygger på att transformatorns beräknade parametrar jämförs mot en databas med standardtransformatorer.

Jämförelsen bör omfatta flera parametrar samtidigt. Det räcker inte att endast jämföra märkeffekt, eftersom en transformator även måste matcha rätt primärspänning, sekundärspänning, frekvens, vektorgrupp och kylmetod. Om endast effekten matchar men spänningen eller vektorgruppen inte stämmer kan transformatorn ändå vara olämplig. Därför behöver standardjämförelsen betraktas som en teknisk matchning mellan flera krav.

Om verktyget hittar en matchning i databasen kan transformatorn klassificeras som en standardlösning. Detta är fördelaktigt eftersom standardtransformatorer ofta har kortare leveranstid, lägre kostnad och mindre teknisk osäkerhet. Om ingen matchning hittas klassificeras transformatorn som specialbyggd. I detta fall blir förfrågningsunderlaget särskilt viktigt, eftersom det sammanställer de tekniska krav som behöver skickas till en transformatorleverantör.



TRANSFORMER INQUIRY / ORDER SPECIFICATION

Innomotics GmbH · MV Drive System Engineering · For External Transformer Sourcing · v5.0

CUSTOM transformer required — no standard size found for 22,0/3,3 kV at 8 088 kVA — see section E

PROJECT INFORMATION			
Project Name / Reference:			
Prepared by:			
Date:			
Revision / Issue:			

ELECTRICAL SPECIFICATION ← auto-calculated from CALC_TRAFO			
Rated Power (MVA)	**8,088**	MVA	*Custom spec value*
Primary Voltage	**22,0**	kV	*Grid voltage*
Secondary Voltage	**3,3**	kV	*Motor / drive voltage*
Frequency	**50**	Hz	*Grid frequency*
Rated Primary Current	**212,3**	A	*Calculated: MVA/(√3×U_pri)*
Rated Secondary Current	**1 415,0**	A	*Calculated: MVA/(√3×U_sec)*

DESIGN SPECIFICATION			
Cooling Type	**ONAN**	–	*ONAN/ONAF/OFAF/AN-AF*
Vector Group	**Dyn11**	–	*Dyn11 typical for VFD supply*
Impedance (%uk)	**6,0**	%	*Affects fault level — confirm with protection engineer*
IP-protection rating	**IP33**	–	

CONVERTER / FRONT-END DATA			
Front-End Type	**AFE**	–	*AFE=Active / DFE=Diode rectifier*
Pulse Configuration	**12-pulse**	–	*DFE only: 12 / 24 / 36-pulse*
No. of Secondary Windings	**1**	–	*DFE: 2/4/6 windings | AFE: 1*
Winding Group MVA (DFE)	**8,088**	MVA	*MVA per individual winding group*
Selected Converter Model	**GH180 – 6SR5 375A (15 cells)**	–	*GH180 model from selection*

STANDARD TRANSFORMER CROSS-CHECK			
Nearest Standard Rating	**CUSTOM REQUIRED**	kVA	*From DATABASE preferred list*
Standard Size Loading	**n/a**		

CUSTOM transformer required — no standard size found for 22,0/3,3 kV at 8 088 kVA — see section E

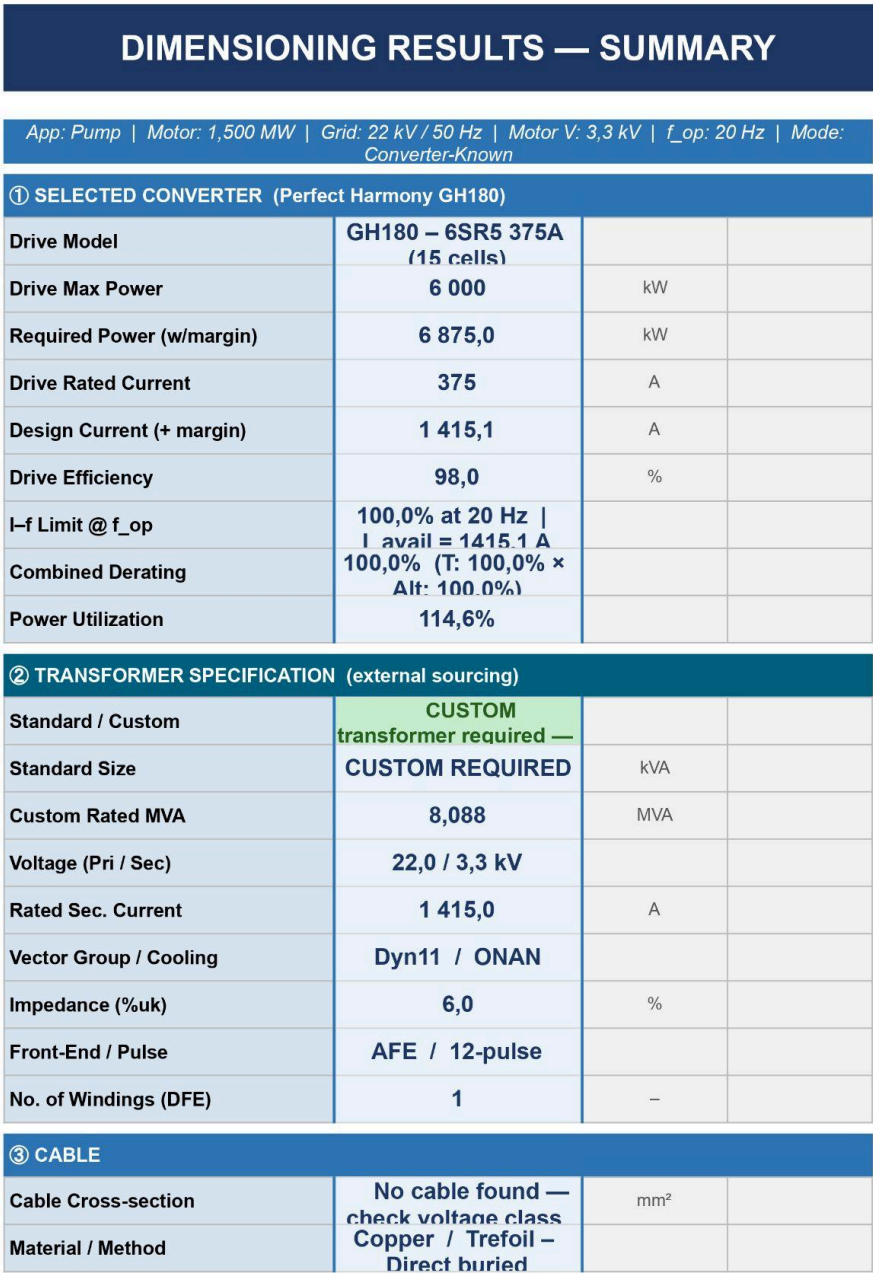
SOURCE MOTOR & DRIVE DATA (calculation basis)			
Motor Power	**1,500**	MW	*Shaft power*
Motor Voltage	**3,3**	kV	*Nominal*
Motor Power Factor cosφ	**0,850**	–	
Motor Efficiency η	**96,0**	%	
Motor Nominal Current	**1 286,4**	A	*I=P/(√3·U·cosφ·η)*
Design Current (+ margin)	**1 415,1**	A	*With safety margin*
Derating Applied	**100,0% combined (Temp + Altitude)**		

Figur [4.7]: Förfrågningsunderlag för tranformator genererad av verktyget. Underlaget sammanställer beräknade transformatorvärden, omriktardata och motordata samt visar om en standardtransformator är möjlig eller om en kundanpassad transformator krävs.

Denna funktion har stor praktisk betydelse. I tidiga projektfaser är det viktigt att snabbt kunna bedöma om en lösning sannolikt kan realiseras med standardkomponenter eller om den kräver specialanpassning. Detta påverkar både teknisk risk, kostnad, leveranstid och projektplanering. Genom att verktyget gör denna klassificering automatiskt får användaren ett tydligare beslutsunderlag.

4.8 Resultatpresentation och statusmeddelanden

RESULTS-fliken sammanfattar verktygets viktigaste resultat i en mer lättläst form. Syftet med denna flik är att användaren snabbt ska kunna se om den inmatade lösningen är tekniskt rimlig, vilken omriktare som är aktuell, vilka dimensionerande värden som gäller och om transformatorn klassificeras som standard eller special.



DIMENSIONING RESULTS — SUMMARY

App: Pump | Motor: 1,500 MW | Grid: 22 kV / 50 Hz | Motor V: 3,3 kV | f_op: 20 Hz | Mode: Converter-Known

① SELECTED CONVERTER (Perfect Harmony GH180)			
Drive Model	GH180 – 6SR5 375A (15 cells)		
Drive Max Power	6 000	kW	
Required Power (w/margin)	6 875,0	kW	
Drive Rated Current	375	A	
Design Current (+ margin)	1 415,1	A	
Drive Efficiency	98,0	%	
I–f Limit @ f_op	100,0% at 20 Hz | I_avail = 1415.1 A		
Combined Derating	100,0% (T: 100,0% × Alt: 100.0%)		
Power Utilization	114,6%		

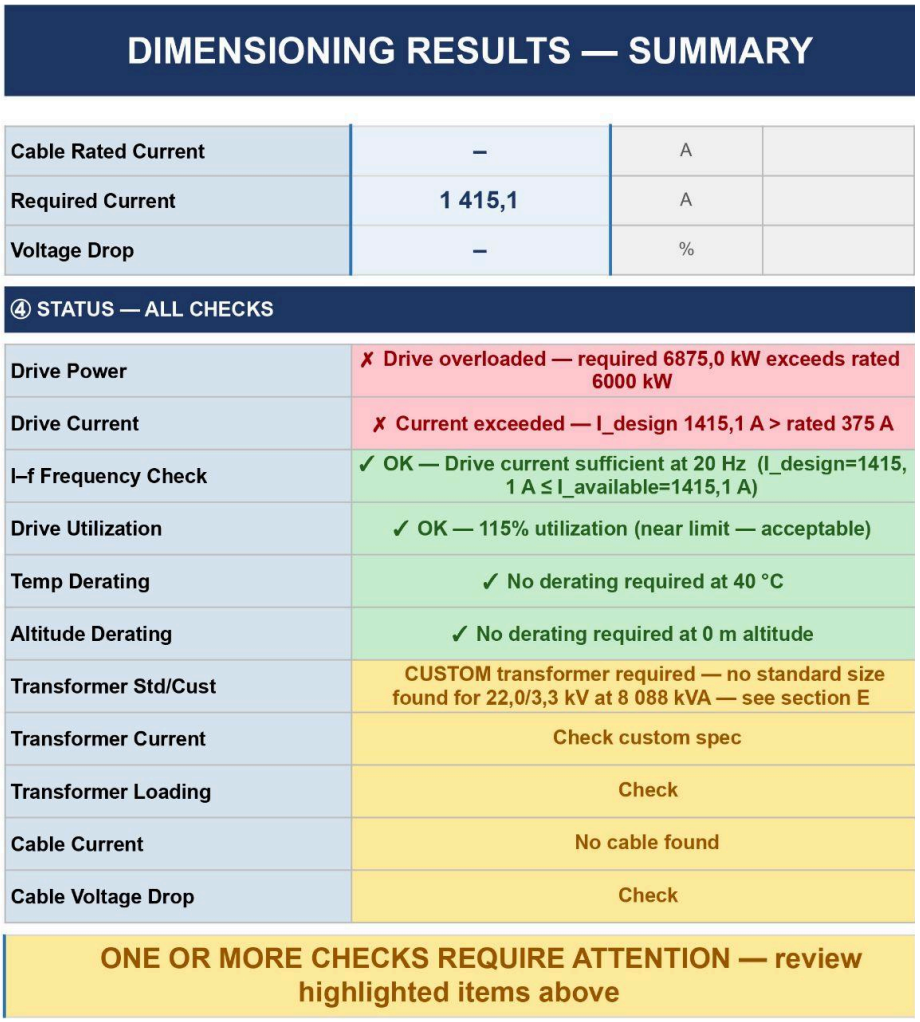
② TRANSFORMER SPECIFICATION (external sourcing)			
Standard / Custom	CUSTOM transformer required —		
Standard Size	CUSTOM REQUIRED	kVA	
Custom Rated MVA	8,088	MVA	
Voltage (Pri / Sec)	22,0 / 3,3 kV		
Rated Sec. Current	1 415,0	A	
Vector Group / Cooling	Dyn11 / ONAN		
Impedance (%uk)	6,0	%	
Front-End / Pulse	AFE / 12-pulse		
No. of Windings (DFE)	1	–	

③ CABLE			
Cable Cross-section	No cable found — check voltage class	mm²	
Material / Method	Copper / Trefoil – Direct buried		

Figur [4.8]: Resultatsammanfattning från dimensioneringsverktyget. Figuren visar vald omriktare, transformatorstatus och kabelkontroll baserat på angivna nät-, motor- och installationsdata.

En väl utformad resultatflik är viktig eftersom användaren inte ska behöva gå igenom alla beräkningsflikar för att förstå verktygets slutsats. RESULTS-fliken fungerar därför som ett sammanfattande beslutsstöd. Här bör centrala värden som motoreffekt, designström, vald omriktare, omriktarstatus, transformatorns märkeffekt, transformatorstatus och eventuella varningar presenteras tydligt.

Statusmeddelanden är en viktig del av resultatpresentationen. Verktyget bör kunna visa exempelvis om vald omriktare är godkänd, om designströmmen är för hög, om ingen standardtransformator hittas eller om användaren behöver kontrollera vissa parametrar manuellt. Dessa meddelanden gör verktyget mer användbart eftersom de hjälper användaren att förstå vad som behöver göras härnäst.



DIMENSIONING RESULTS — SUMMARY

Cable Rated Current	–	A	
Required Current	1 415,1	A	
Voltage Drop	–	%	

④ STATUS — ALL CHECKS

Drive Power	✗ Drive overloaded — required 6875,0 kW exceeds rated 6000 kW
Drive Current	✗ Current exceeded — I_design 1415,1 A > rated 375 A
I–f Frequency Check	✓ OK — Drive current sufficient at 20 Hz (I_design=1415, 1 A ≤ I_available=1415,1 A)
Drive Utilization	✓ OK — 115% utilization (near limit — acceptable)
Temp Derating	✓ No derating required at 40 °C
Altitude Derating	✓ No derating required at 0 m altitude
Transformer Std/Cust	CUSTOM transformer required — no standard size found for 22,0/3,3 kV at 8 088 kVA — see section E
Transformer Current	Check custom spec
Transformer Loading	Check
Cable Current	No cable found
Cable Voltage Drop	Check

ONE OR MORE CHECKS REQUIRE ATTENTION — review highlighted items above

Figur [4.81]: Sammanställning av verktygets statuskontroll. Tabellen visar vilka dimensioneringskrav som är uppfyllda och vilka delar som kräver vidare kontroll, exempelvis omriktarbelastning, transformatorval och kabeldimensionering.

För att förbättra tydligheten kan resultatfliken även använda färgkodning, exempelvis grönt för godkänd lösning, gult för varning och rött för ej godkänd lösning. Detta gör det lättare att snabbt tolka resultatet, särskilt om verktyget används i en offert- eller diskussionssituation.

4.9 Funktionella resultat och teknisk nytta

Det utvecklade verktyget uppfyller den övergripande målsättningen att skapa en mer strukturerad och spårbar dimensioneringsprocess för mellanspänningsdrivsystem. Genom att samla indata, databaser, beräkningar, frekvenskurvor, resultat och transformatorunderlag i samma Excel-fil skapas ett sammanhängande arbetsflöde. Detta minskar behovet av separata manuella beräkningar och gör det lättare att följa hur tekniska beslut uppstår.

En av verktygets viktigaste funktionella styrkor är att det kan hantera både fallet där omriktaren ska väljas och fallet där omriktaren redan är känd. Detta gör verktyget mer flexibelt och bättre anpassat till praktiskt ingenjörsarbete. I vissa projekt behöver användaren först hitta en lämplig omriktare, medan det i andra projekt främst handlar om att skapa ett transformatorunderlag utifrån en redan vald omriktare.

En annan viktig styrka är att verktyget integrerar transformatorn i dimensioneringsprocessen. Detta gör att transformatorbehovet kan kopplas direkt till omriktarens krav, front-end-typ och pulstal. Verktyget kan även avgöra om transformatorn motsvarar en standardlösning eller om specialtillverkning krävs. Denna funktion ger ett tydligt praktiskt värde eftersom den påverkar både teknisk projektering och offertarbete.

Verktyget bidrar också till ökad transparens. Eftersom beräkningarna är uppdelade i separata flikar och mellanresultat kan följas blir det möjligt för användaren att förstå hur slutresultatet har tagits fram. Detta är viktigt i tekniska organisationer där resultat behöver kunna granskas, diskuteras och vidareutvecklas.

4.10 Begränsningar i resultatet

Även om verktyget ger ett strukturerat beslutsstöd är det viktigt att betona att resultatet är avsett för tidiga projektfaser. Verktyget ersätter inte fullständig detaljprojektering, tillverkarens konfigurationsverktyg eller verifiering mot samtliga tekniska standarder. Det bör därför användas som ett preliminärt stöd snarare än som ett slutgiltigt dimensioneringssystem.

Verktygets noggrannhet är beroende av kvaliteten på databaserna. Om omriktardata, transformatorstandarder, kabeldata eller deratingtabeller är ofullständiga påverkas även resultatet. Därför behöver databaserna uppdateras kontinuerligt om verktyget ska användas i praktiken över tid.

En annan begränsning är att verktyget förenklar vissa tekniska samband. Exempelvis genomförs ingen fullständig harmonikanalys, dynamisk simulering eller detaljerad skyddsselektivitet. Kortslutningsnivån används som en indikator på nätets styrka, men verktyget ersätter inte en fullständig nätstudie.

Trots dessa begränsningar visar resultatet att ett välstrukturerat Excel-verktyg kan skapa betydande nytta i ett tidigt skede. Det ger användaren ett mer systematiskt sätt att hantera dimensioneringen och bidrar till att tekniska beslut blir mer enhetliga, spårbara och kommunicerbara.

5. Diskussion

5.1 Metodens lämplighet och genomförande

Den metod som valts i arbetet, det vill säga en iterativ utvecklingsprocess med kontinuerlig återkoppling från en industriell partner, har varit väl anpassad till problemets karaktär. Dimensionering av mellanspänningsdrivsystem är inte en helt linjär process där varje steg kan definieras slutgiltigt från början. I praktiken påverkas dimensioneringen av flera beroenden mellan motor, omriktare, transformator, nät, kablage och installationsförhållanden. Ett beslut i en del av systemet kan därmed påverka flera andra delar. Exempelvis kan valet av omriktartyp påverka transformatorns utformning, samtidigt som nätets kortslutningsnivå och spänningsnivå kan begränsa vilka omriktarlösningar som är lämpliga.

Mot denna bakgrund hade en strikt linjär metod riskerat att ge ett verktyg som visserligen var teoretiskt strukturerat, men inte tillräckligt förankrat i hur dimensionering genomförs i praktiken. Genom att i stället arbeta iterativt har det varit möjligt att utveckla verktyget stegvis, testa struktur och funktionalitet, identifiera brister och därefter justera beräkningsflödet. Detta har varit särskilt viktigt eftersom flera delar av kravbilden blev tydligare först när en första version av verktyget fanns att diskutera kring.

Ett exempel är hanteringen av transformatorn. I ett tidigt skede kunde transformatorberäkningen betraktas som en efterföljande del av omriktarvalet. Under arbetets gång blev det dock tydligt att transformatorn behövde integreras mer aktivt i dimensioneringsprocessen, särskilt eftersom front-end-typ, pulstal och vektorgrupp påverkar transformatorns tekniska utformning. På liknande sätt blev behovet av ett transformer inquiry data sheet tydligare när verktygets praktiska användning diskuterades. Detta visar att den iterativa metoden inte bara har förbättrat verktygets användargränssnitt, utan även påverkat den tekniska strukturen i själva dimensioneringsmodellen.

Samtidigt finns en begränsning med den iterativa metoden. Eftersom utvecklingen har skett i nära samspel med ett specifikt industriellt behov riskerar vissa lösningar att bli anpassade till just detta sammanhang. Det kan innebära att verktyget fungerar väl för de omriktare, transformatorprinciper och arbetsflöden som varit aktuella i projektet, men att det kräver vidare anpassning för att användas mer generellt. Det finns därför en avvägning mellan praktisk relevans och generell tillämpbarhet. I detta arbete har praktisk relevans prioriterats, eftersom syftet har varit att utveckla ett beslutsstöd för ett konkret industriellt användningsområde.

5.2 Modellering, förenklingar och tekniska antaganden

En central utmaning i arbetet har varit att översätta en komplex teknisk verklighet till en modell som är hanterbar i ett Excel-baserat verktyg. Ett mellanspänningsdrivsystem påverkas av många faktorer som i en fullständig projektering skulle kunna kräva detaljerade

simuleringar, tillverkarens interna modeller och omfattande nätstudier. Inom ramen för detta arbete har det därför varit nödvändigt att göra förenklingar. Dessa förenklingar är inte ett uttryck för att vissa aspekter är oviktiga, utan en konsekvens av verktygets syfte: att stödja preliminär dimensionering i ett tidigt skede.

Exempelvis behandlas kabeldimensionering och nätpåverkan på en övergripande nivå. Verktyget kan använda ström, spänning, kabellängd och kabeldata för att ge en preliminär bedömning, men det ersätter inte en fullständig projektering där hänsyn tas till installationssätt, omgivningstemperatur, grupperingsfaktorer, skyddsvillkor och lokala standardkrav. På samma sätt kan kortslutningsnivån användas som en indikation på nätets styrka, men verktyget genomför inte en fullständig dynamisk nätanalys eller harmonisk studie.

Dessa avgränsningar är rimliga för ett verktyg som är avsett att användas i tidiga projekt- och offertskeden. I ett sådant skede är målet ofta att avgöra om en teknisk lösning är rimlig, vilka huvudkomponenter som kan vara aktuella och om det finns tydliga risker eller behov av vidare analys. Verktyget bör därför inte tolkas som ett slutgiltigt dimensioneringssystem, utan som ett strukturerat beslutsstöd. Den viktigaste funktionen är att skapa ordning i de tidiga tekniska besluten och att synliggöra vilka parametrar som påverkar resultatet.

Samtidigt innebär förenklingarna att resultaten måste tolkas med försiktighet. Ett resultat som är godkänt enligt verktyget innebär inte automatiskt att lösningen är färdigprojekterad eller fullständigt verifierad. Det innebär snarare att lösningen, utifrån de indata och antaganden som verktyget hanterar, framstår som tekniskt rimlig. Detta är en viktig distinktion. Om verktyget används utan förståelse för dess begränsningar finns en risk att resultaten ges större tyngd än de bör ha. Därför är transparens i beräkningsflödet och tydliga statusmeddelanden viktiga delar av verktygets kvalitet.

En styrka i den valda modelleringen är att den separerar olika beräkningssteg. Grundström, derating, designmarginal, omriktarval, transformatorberäkning och standardjämförelse hanteras som separata delar. Detta gör det möjligt att följa hur varje faktor påverkar slutresultatet. En mer sammanpressad modell hade kunnat ge ett snabbare svar, men hade samtidigt gjort det svårare att förstå varför en viss omriktare eller transformator föreslås. För ett ingenjörsverktyg är denna spårbarhet viktig, eftersom resultatet behöver kunna granskas, motiveras och vid behov ifrågasättas.

5.3 Omriktarval och teknisk realitet

En viktig slutsats från arbetet är att val av mellanspänningsomriktare inte bör baseras enbart på motorns nominella effekt. Ett sådant tillvägagångssätt är för förenklat eftersom det inte tar hänsyn till strömkapacitet, spänningsnivå, driftfrekvens, momentkrav, derating, topologi eller nätförhållanden. I praktiken är det ofta strömmen, snarare än effekten, som blir dimensionerande. Detta beror på att termiska begränsningar i halvledare, kablar, transformatorlindningar och anslutningar i stor utsträckning är kopplade till strömflödet.

Det utvecklade verktyget tar därför utgångspunkt i beräkningen av motorström och designström. Detta är en styrka, eftersom det skapar en tydlig koppling mellan motordata och de komponenter som ska dimensioneras. Genom att sedan jämföra designströmmen med omriktarens tillåtna strömkapacitet blir urvalet mer tekniskt relevant än om endast effekt jämförs. Vidare gör inkluderingen av frekvensberoende drift att verktyget bättre kan hantera situationer där den mest kritiska driftpunkten inte sammanfaller med nominell drift.

Detta är särskilt viktigt i industriella applikationer där lasten varierar över driftområdet. En motor kan exempelvis ha en nominell driftpunkt vid 50 Hz, men applikationen kan kräva högt moment vid betydligt lägre frekvens. I sådana fall kan strömmen vid låg frekvens vara dimensionerande. Om verktyget endast hade utgått från märkdata vid nominell drift hade denna belastning kunnat förbises. Genom DRIVE_CURVES-fliken blir det möjligt att visualisera hur ström, moment och effekt varierar med frekvens, vilket gör dimensioneringen mer systemorienterad.

Samtidigt innebär detta att verktyget blir mer komplext. Ett enklare verktyg hade kunnat ge snabbare resultat och kräva färre indata, men det hade också riskerat att missa viktiga tekniska begränsningar. Det utvecklade verktyget representerar därför en kompromiss mellan användarvänlighet och teknisk noggrannhet. Ju fler parametrar som inkluderas, desto mer realistiskt kan resultatet bli, men samtidigt ökar kraven på användaren och på databasens kvalitet. Detta är en viktig balans i alla ingenjörsverktyg: ett verktyg måste vara tillräckligt detaljerat för att vara tekniskt relevant, men inte så komplext att det blir svårt att använda eller underhålla.

En annan viktig aspekt är att verktyget bör kunna förklara varför en viss omriktare inte är lämplig. Om resultatet endast blir “No suitable drive” får användaren begränsad hjälp. Ett mer användbart verktyg bör visa om begränsningen beror på för hög ström, fel spänningsnivå, otillräcklig effektkapacitet eller inkompatibel front-end-konfiguration. Denna typ av felsökningsstöd är avgörande om verktyget ska fungera som ett praktiskt beslutsstöd och inte enbart som en beräkningsmall.

5.4 Transformatorns roll och praktisk användbarhet

En av de mest betydelsefulla delarna av arbetet är att transformatorn har integrerats i dimensioneringsprocessen. I många sammanhang kan transformatorn lätt behandlas som en komponent som väljs efter att omriktaren redan är bestämd. Detta arbete visar att en sådan uppdelning kan vara problematisk, eftersom transformatorn påverkas direkt av omriktarens krav, nätets spänningsnivå, front-end-typ, pulstal, vektorgrupp och kylmetod. Transformatorn är därför inte bara en efterföljande komponent, utan en del av systemets grundläggande arkitektur.

Genom att inkludera transformatorberäkningen i verktyget skapas en tydligare koppling mellan omriktarval och systemets praktiska genomförbarhet. Detta är särskilt viktigt i de fall där en diode front end-lösning används, eftersom multipulssystem kan kräva särskilda

sekundärlindningar och fasförskjutningar. Ett val av 12-, 24- eller 36-puls påverkar därmed transformatorns konstruktion. Om detta inte beaktas tidigt finns en risk att omriktarvalet ser rimligt ut, men att transformatorlösningen senare visar sig vara mer komplicerad eller kräva specialtillverkning.

Funktionen att avgöra om transformatorn motsvarar en standardlösning eller behöver specialbyggas är därför mycket viktig. Denna klassificering har inte bara teknisk betydelse, utan även praktisk och ekonomisk betydelse. En standardtransformator kan ofta innebära kortare leveranstid, lägre kostnad och mindre teknisk osäkerhet. En specialtransformator kräver däremot mer detaljerad specifikation, kontakt med leverantör och ofta längre ledtid. Genom att verktyget tidigt kan indikera detta får användaren bättre underlag för planering och offertarbete.

Inquiry data sheet-funktionen är ett av verktygets mest konkreta bidrag. Den gör att resultatet från beräkningarna kan omsättas till ett strukturerat tekniskt underlag som kan användas i dialog med transformatorleverantör. Detta minskar risken för att viktig information tappas bort eller behöver sammanställas manuellt i efterhand. Samtidigt förbättras kommunikationen mellan olika aktörer i projektet, eftersom underlaget samlar centrala parametrar såsom primär- och sekundärspänning, ström, effekt, frekvens, vektorgrupp, kylmetod, front-end-typ och pulstal.

Det är dock viktigt att betona att inquiry data sheet inte ersätter transformatorleverantörens slutliga konstruktion. Leverantören behöver fortfarande verifiera termisk dimensionering, isolationsnivåer, kortslutningshållfasthet, mekanisk konstruktion och tillverkningsbarhet. Verktygets roll är att skapa ett kvalificerat första underlag, inte att färdigkonstruera transformatorn. Denna avgränsning är viktig för att verktygets resultat ska användas på rätt sätt.

5.5 Excel som plattform

Valet av Excel som plattform har både tydliga fördelar och tydliga begränsningar. Den största fördelen är tillgängligheten. Excel används redan brett inom industrin och kräver normalt ingen särskild installation, programmeringsmiljö eller utbildning. Detta gör plattformen lämplig för ett verktyg som ska kunna användas av ingenjörer eller teknisk personal i ett tidigt projekt- och offertskede. Excel gör det också möjligt att snabbt utveckla, testa och justera beräkningslogik.

En annan fördel är transparensen. I ett välstrukturerat Excel-verktyg kan användaren följa formler, mellanresultat och databaskopplingar. Detta är viktigt i tekniska sammanhang där resultat inte bör uppfattas som en svart låda. Genom att separera INPUT, DATABASE, CALC_DRIVE, CALC_TRAFO, DRIVE_CURVES, RESULTS och TRAFO_INQUIRY kan verktyget byggas upp på ett sätt som gör beräkningsflödet relativt lätt att följa. Denna struktur gör det också lättare att uppdatera databaser eller vidareutveckla enskilda delar av verktyget.

Samtidigt är Excel inte utvecklat för avancerad systemmodellering. När antalet beroenden, formler och databaskopplingar ökar finns en risk att verktyget blir svårt att överblicka. Små fel i formler, cellreferenser eller format kan få stor påverkan på resultatet. Detta gör att ett Excel-baserat dimensioneringsverktyg kräver noggrann struktur, tydlig dokumentation och skydd mot felaktig inmatning. Fördefinierade val, datavalidering, låsta beräkningsceller och tydliga statusmeddelanden blir därför viktiga delar av verktygets kvalitet.

På längre sikt kan det vara relevant att överväga andra plattformar för vidareutveckling. Ett mer avancerat programvaruverktyg skulle kunna erbjuda bättre versionshantering, säkrare databasstruktur, mer avancerad logik och bättre integration med externa konfigurationsverktyg. Samtidigt skulle en sådan lösning kräva mer utvecklingstid, mer underhåll och eventuellt mer utbildning för användarna. Excel framstår därför som ett lämpligt första steg, särskilt eftersom arbetets syfte är att utveckla och testa dimensioneringslogiken snarare än att skapa en färdig kommersiell programvara.

5.6 Validering och tillförlitlighet

Valideringen av verktyget har i detta arbete varit begränsad till rimlighetsbedömningar, handberäkningar och tester av hur verktyget reagerar på förändrade indata. Detta är en rimlig nivå inom ramen för ett examensarbete, men innebär samtidigt att verktygets tillförlitlighet inte kan betraktas som fullständigt verifierad. För att verktyget ska kunna användas i skarp industriell drift krävs en mer omfattande validering mot verkliga projektfall och tillverkarens interna beräkningsmodeller.

De grundläggande beräkningarna, exempelvis ström och skenbar effekt, kan relativt enkelt kontrolleras genom handberäkningar. Detta ger en första trygghet i att de mest centrala sambanden är korrekt implementerade. Däremot är det svårare att validera hela dimensioneringskedjan, eftersom resultatet beror på flera samverkande faktorer: produktdata, derating, frekvenskurvor, standardtransformatorer och användarens indata. Ett korrekt resultat kräver alltså inte bara korrekta formler, utan även att databaserna är kompletta och uppdaterade.

En viktig del av fortsatt validering vore därför att testa verktyget mot verkliga eller historiska projektfall. Om verktygets resultat jämförs med lösningar som tidigare har tagits fram manuellt eller med hjälp av Innomotics interna verktyg kan dess precision och praktiska användbarhet bedömas mer systematiskt. Det vore även värdefullt att testa föreslagna omriktare i ett konfigurationsverktyg för att se om motsvarande produktkonfiguration och artikelnummer kan tas fram. Detta skulle skapa en starkare koppling mellan Excel-verktyget och företagets faktiska produktprocess.

För transformatorn vore en viktig validering att skicka ett genererat inquiry data sheet till en transformatorleverantör och be om återkoppling på om informationen är tillräcklig för offert. En sådan kontroll skulle ge värdefull information om vilka parametrar som eventuellt saknas

och hur underlaget bör förbättras. Den skulle även stärka verktygets industriella relevans, eftersom det visar om resultatet faktiskt kan användas i leverantörsdialog.

5.7 Hållbarhet, resursanvändning och ingenjörsansvar

Dimensionering av elektriska drivsystem har en tydlig koppling till hållbar utveckling. Ett korrekt dimensionerat drivsystem kan bidra till minskade energiförluster, bättre resursutnyttjande och längre livslängd för både elektriska och mekaniska komponenter. Särskilt i industriella applikationer, där stora motorer ofta är i drift under många timmar per år, kan även små förbättringar i verkningsgrad eller driftpunkt få betydande energimässig påverkan över tid.

Ett strukturerat dimensioneringsverktyg kan bidra till hållbarhet på flera sätt. För det första kan det minska risken för underdimensionering, vilket annars kan leda till överhettning, driftstörningar, förkortad livslängd och behov av tidigt komponentbyte. För det andra kan det minska risken för onödig överdimensionering. Överdimensionering kan visserligen ge marginaler, men leder också till högre materialanvändning, större komponenter, högre investeringskostnad och ibland sämre driftoptimering. Ett välbalanserat verktyg kan därför bidra till mer rimliga teknikval.

Ur miljösynpunkt är detta relevant eftersom både energianvändning och materialanvändning är centrala aspekter av industriella elsystem. Om verktyget stödjer val av en omriktare och transformator som är tillräckligt dimensionerade utan att vara onödigt stora kan det bidra till minskat resursutnyttjande. Samtidigt kan bättre anpassning av drivsystem till processens behov leda till lägre energiförbrukning, särskilt i applikationer där varvtalsreglering ersätter mekanisk strypning eller ineffektiv drift.

Det finns även en etisk dimension. Ett dimensioneringsverktyg kan ge användaren en känsla av säkerhet, men det får inte ersätta ingenjörsmässigt omdöme. Om användaren okritiskt accepterar verktygets resultat utan att förstå antaganden och begränsningar kan det leda till felaktiga beslut. Därför är transparens, statusmeddelanden och tydliga avgränsningar viktiga. Verktyget ska stödja ingenjören, inte ersätta ingenjörens ansvar.

I detta arbete har hållbarhet därför inte behandlats som en separat fråga, utan som en del av verktygets övergripande syfte. Genom att skapa en mer spårbar, konsekvent och tekniskt motiverad dimensioneringsprocess kan verktyget bidra till bättre beslut i tidiga projektfaser. Det är i dessa tidiga skeden som många viktiga val görs, och där felaktiga antaganden kan bli kostsamma att korrigera senare.

5.8 Fortsatt utveckling

Det utvecklade verktyget bör ses som en prototyp med god potential för vidareutveckling. En naturlig fortsättning är att förbättra databaserna och säkerställa att de innehåller fullständig och uppdaterad produktinformation. Särskilt viktigt är data för GH180-omriktare, deratingtabeller, frekvensberoende kapacitetskurvor och standardtransformatorer. Ju mer komplett databasen blir, desto mer tillförlitligt blir verktygets resultat.

En annan viktig förbättring är att utveckla mer detaljerade statusmeddelanden. I stället för att enbart visa om en lösning är godkänd eller inte bör verktyget kunna förklara orsaken. Exempelvis bör användaren kunna se om en omriktare faller bort på grund av spänning, ström, effekt, frekvensområde eller front-end-kompatibilitet. Detta skulle göra verktyget mer pedagogiskt och mer användbart vid felsökning.

Vidare bör inquiry data sheet testas mot verkliga transformatorleverantörer. Detta skulle ge värdefull återkoppling om vilka parametrar som är tillräckliga och vilka som behöver kompletteras. Om leverantören exempelvis efterfrågar kortslutningsimpedans, isolationsnivå, temperaturklass eller installationsmiljö kan dessa fält läggas till i verktyget.

På längre sikt kan verktyget även kopplas till externa konfigurationsverktyg, exempelvis för att generera artikelnummer eller MLFB för vald omriktare. En sådan integration skulle göra verktyget mer användbart i offertarbete, eftersom teknisk dimensionering då kan kopplas direkt till produktkonfiguration och prisunderlag. Det skulle dock kräva tillgång till tillverkarens konfigurationsdata och eventuellt en mer avancerad programvarulösning än Excel.

6. Slutsatser

Detta examensarbete har resulterat i utvecklingen av ett Excel-baserat dimensioneringsverktyg för mellanspänningsomriktare och tillhörande transformatorlösningar. Verktyget är avsett att användas i tidiga projekt- och offertskeden, där det finns behov av att snabbt kunna göra tekniskt rimliga bedömningar utan att genomföra fullständig detaljprojektering. Arbetet har därmed fokuserat på att strukturera en dimensioneringsprocess som i praktiken ofta är komplex, beroende av flera tekniska parametrar och delvis baserad på erfarenhet samt information från olika källor.

En övergripande slutsats är att det är möjligt att samla relevanta indata, produktdata, beräkningsmodeller och ingenjörsmässiga avvägningar i ett gemensamt och transparent Excel-verktyg. Genom att separera indata, databaser, beräkningar och resultat i olika flikar har verktyget fått en struktur som gör dimensioneringskedjan mer överskådlig och spårbar. Detta är viktigt eftersom användaren inte enbart behöver få ett slutresultat, utan även kunna förstå hur resultatet har uppstått och vilka parametrar som har påverkat det.

Arbetet visar även att dimensionering av ett mellanspänningsdrivsystem inte bör reduceras till ett enkelt val baserat på motorns märkeffekt. I stället behöver flera tekniska faktorer beaktas samtidigt, däribland ström, spänningsnivå, effektfaktor, verkningsgrad, derating, driftfrekvens, momentkarakteristik, front-end-topologi och nätförhållanden. Genom att inkludera dessa parametrar i verktygets logik skapas ett mer realistiskt beslutsunderlag än vid en rent nominell jämförelse mellan motor och omriktare.

En särskilt viktig slutsats är att strömmen utgör en central dimensionerande storhet i hela arbetsflödet. Den beräknade motorströmmen ligger till grund för val och kontroll av omriktare, men påverkar även transformatorns märkdata, kabelrelaterade kontroller och systemets övergripande belastningsnivå. Att verktyget utgår från en beräknad designström, snarare än enbart från aktiv effekt, stärker därför den tekniska relevansen i dimensioneringen.

Vidare har arbetet visat att transformatorn bör behandlas som en integrerad del av dimensioneringsprocessen, inte som en separat komponent som väljs först efter att omriktaren har bestämts. Transformatorns utformning påverkas av nätspänning, omriktarens krav, front-end-typ, pulstal, vektorgrupp och kylmetod. Genom att inkludera transformatorberäkningen direkt i verktyget skapas en tydligare koppling mellan omriktarval och systemets praktiska genomförbarhet.

Funktionen att generera ett transformer inquiry data sheet är ett av arbetets mest konkreta resultat. Den gör det möjligt att sammanställa de viktigaste transformatorparametrarna i ett strukturerat förfrågningsunderlag som kan användas i dialog med leverantörer. Detta innebär att verktyget inte enbart fungerar som ett internt beräkningsstöd, utan även som ett hjälpmedel för att föra resultatet vidare i projekt- och offertprocessen. Möjligheten att särskilja mellan standardtransformator och specialbyggd transformator har också tydlig

praktisk betydelse, eftersom detta påverkar kostnad, leveranstid, teknisk risk och fortsatt projektering.

En annan slutsats är att Excel, trots sina begränsningar, är en lämplig plattform för denna typ av tidigt dimensioneringsstöd. Plattformen är lättillgänglig, välkänd inom industrin och möjliggör transparenta beräkningar där formler och mellanresultat kan granskas. Detta gör Excel särskilt användbart i en prototypfas, där dimensioneringslogiken behöver utvecklas, testas och kommuniceras. Samtidigt innebär valet av Excel att verktyget måste byggas upp med tydlig struktur, god dokumentation och noggrann hantering av indata för att minska risken för felaktig användning.

Det är dock viktigt att betona att verktyget ska betraktas som ett beslutsstöd för preliminär dimensionering, inte som ett fullständigt verifierat dimensioneringssystem. Verktygets resultat är beroende av de antaganden, databaser och förenklingar som används. Det ersätter därför inte tillverkarens interna konfigurationsverktyg, detaljerade nätstudier, harmonikanalyser, skyddsberäkningar eller transformatorleverantörens slutliga konstruktion och verifiering. En slutlig teknisk lösning kräver fortfarande ingenjörsmässig bedömning och kompletterande analyser.

Samtidigt visar arbetet att ett välstrukturerat verktyg kan skapa betydande värde även i ett tidigt skede. Genom att samla teknisk information och beräkningslogik i ett gemensamt arbetsflöde minskar risken för inkonsekventa bedömningar och manuella fel. Verktyget gör det också lättare att kommunicera tekniska krav mellan olika aktörer, exempelvis säljingenjörer, systemingenjörer, examinatorer, handledare och externa leverantörer.

Sammanfattningsvis visar examensarbetet att en strukturerad och transparent implementering av dimensioneringslogik i Excel kan bidra till en mer enhetlig och effektiv dimensioneringsprocess för mellanspänningsdrivsystem. Verktyget utgör därmed ett relevant första steg mot ett mer systematiserat arbetssätt för val av MV-omriktare och transformatorlösning. För att verktyget ska kunna användas i skarp industriell miljö krävs dock fortsatt validering mot verkliga projektfall, uppdaterade produktdata och eventuell koppling till externa konfigurationsverktyg.

7. Referenser

[1] H. Abu-Rub, J. Holtz, J. Rodriguez and G. Baoming, “Medium-Voltage Multilevel Converters—State of the Art, Challenges, and Requirements in Industrial Applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2581–2596, Aug. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2043039. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2043039 Hämtad: 12 mars 2026.

[2] Innomotics, “Medium Voltage Drives,” Innomotics GmbH. [Online]. Available: https://www.innomotics.com/hub/portfolio/products/medium-voltage-drives. Hämtad: 15 mars 2026.

[3] Innomotics, “Perfect Harmony GH180,” Innomotics GmbH. [Online]. Available: https://www.innomotics.com/portfolio/products/medium-voltage-drives/perfect-harmony-gh180. Hämtad: 22 april 2026.

[4] IEEE Standards Association, IEEE Std 519-2022, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York, NY, USA: IEEE, 2022. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/. Hämtad: 12 maj 2026.

[5] IEEE Standards Association, IEEE Std C57.110-2018, IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents. New York, NY, USA: IEEE, 2018. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/ieee/C57.110/5948/. Hämtad: 12 maj 2026.

[6] C. H. Lee, Z. W. Liu, C. N. Chen, M. Y. Cho, F. T. Lin and J. A. Jiang, “Assessment of Energy Savings With Variable Speed Drives in Ship’s Cooling Pumps,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 4, pp. 1288–1298, Dec. 2015, doi: 10.1109/TEC.2015.2431733. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2431733 Hämtad: 17 maj 2026.

[7] P. Y. Keskar, “Specification of Variable Frequency Drive Systems to Meet the New IEEE 519 Standard,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, pp. 393–402, Mar./Apr. 1996. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/491489 Hämtad: 25 maj 2026.