

Bachelor Thesis in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2021

# Överspänningskydd

*Surge Protection*

**Sam Falakeh & Jesper Hilleberg**



Examensarbete för Electrical Engineering

**Överspänningsskydd**

Sam Falakeh & Jesper Hilleberg

LiTH-ISY-EX-ET--21/0503—SE

Handledare:

**Tomas Uno Jonsson**

ISY, Linköping University

**Magnus Eng**

Solar Bora

Examinator:

**Tomas Uno Jonsson**

ISY, Linköping Universitet

*Division of Integrated Circuits and Systems  
Department of Electrical Engineering  
Linköping University  
SE-581 83 Linköping, Sweden*

*Copyright 2021 Sam Falakeh & Jesper Hilleberg*

## **Abstract**

Solar Bora is a company that works to bring electricity to small villages in Africa to help them save time in cooking and other things that we nowadays forget about. Africa is the continent with the most thunder strikes in the entire world, and it is therefore common that electronics get affected by this. Our work helps to protect against the surges caused by the electromagnetic pulses that are made by nearby thunder strikes. A surge protection is made using two surge protection devices, a metal oxide varistor and a transient voltage suppression diode in parallel. These are made to short-circuit large transients to ground to protect a circuit from the damaging transient. To test the circuit, we charged a capacitor up to 720 volts and then short-circuited it against the protective circuit to create a high voltage transient. The protective circuit managed to protect against the created transient, but a larger transient would be preferable to see the circuit's full potential.

## Sammanfattning

Solar Bora är ett företag som jobbar med att skapa energi till de små byar i Afrika som inte har tillgång till det, för att hjälpa dem spara tid vid matlagning och andra vardagssysslor som vi tar för givet. Afrika är den kontinent som har mest åsknedslag i hela världen och det är därför vanligt att elektronik skadas utav åsknedslagen. Arbetet som utförs kommer hjälpa skydda den elektroniken tillhörande Solar Boras system mot överspänningar orsakade av de elektromagnetiska pulserna från närliggande åsknedslag. Ett överspänningsskydd skapas genom användningen av en metal oxide varistor och en transient voltage suppression diode parallellkopplat. Dessa kortsluter stora transienter till jord för att skydda kretsen mot den skadande transienten. För att testa kretsen användes en uppladdad kondensator på 720V som sedan kortslöts mot kretsen för att skapa en högspänningstransient. Skyddet lyckades att dämpa transienten som tänkt men större transienter skulle behövts för att visa kretsens fulla potential.

## **Tacksägelse**

Vi vill dela ut ett stort tack till vår handledare på Solar Bora, Magnus Eng för hans stöd och hjälp under vårt uppdrag. Vi tackar även vår handledare och examinator från Linköpings Universitet, Tomas Uno Jonsson för hans vägledning och hans kunskap som varit till stor betydelse för vårt projekt.

# Innehållsförteckning

Introduktion.....	1
1.1 Motivering.....	1
1.2 Syfte .....	1
1.3 Frågeställning .....	1
1.4 Avgränsningar.....	2
Teori.....	3
2.1 Introduktion .....	3
2.2 Åska .....	3
2.3 Elektromagnetisk Puls (EMP).....	3
2.3.1 Lightning-EMP (LEMP) .....	4
2.4 Lightning Protection Zones (LPZ).....	5
2.4.1 Yttre zonen (LPZ0) .....	5
2.4.2 Inre zonen (LPZ1 & LPZ2).....	6
2.5 Surge Protection Device (SPD).....	6
2.5.1 Metal Oxide Varistor (MOV) .....	7
2.5.2 TVS Diod .....	9
2.5.3 TVS Tyristor .....	10
2.5.4 Gas Discharge Tubes (GDT) .....	10
2.5.5 Jämförelse av komponenter .....	11
2.5.6 Faraday Cage.....	11
2.5.7 Ekvationer .....	12
Metod .....	13
3.1 Intro.....	13
3.2 Förundersökning .....	13
3.3 Design.....	14
3.4 Testning.....	15

3.5 Implementering.....	18
<b>Resultat .....</b>	<b>20</b>
4.1 Test utav MOV i verkligheten.....	20
4.2 Test av TVS Diod i verkligheten.....	21
4.3 Test av slutgiltig krets i verkligheten .....	22
4.4 Jämförelse.....	23
<b>Diskussion.....</b>	<b>24</b>
5.1 Resultat .....	24
5.1.1 Strömkurvorna .....	24
5.1.2 Spänningskurvorna .....	24
5.1.3 Effektkurvorna .....	25
5.1.4 Energikurvorna .....	25
5.2 Metod .....	27
5.3 Etik .....	28
5.4 Slutsats .....	29
5.5 Framtida arbete.....	29
5.5.1 Alternativ krets.....	29
5.5.2 Simulering av alternativ krets .....	33

# Figurförteckning

<i>Figur 1. Exempel på hur åskskyddszonerna struktureras.</i>	5
<i>Figur 2. Simplifiering av hur ett överspänningsskydd fungerar.</i>	7
<i>Figur 3. Ungefärligt beteende av en MOV, där resistansen vid läck området är 1-10Ω och 100MΩ vid uppsving området. Vid den vanliga driften är resistansen adaptiv.</i>	8
<i>Figur 4. Exempel på ekvivalent kretsschema av en MOV.</i>	8
<i>Figur 5. Ungefärligt beteende av en symmetrisk TVS diod</i>	9
<i>Figur 6. Design</i>	14
<i>Figur 7. Metal Oxide Varistor symbol skapad i Altium</i>	15
<i>Figur 8. Transient Voltage Supression Diode symbol skapad i Altium.</i>	15
<i>Figur 9. Krets som visar hur det gick till att ladda kondensator.</i>	16
<i>Figur 10. Krets som visar hur det gick till att kortsluta kondensatorn mot resterande krets.</i>	16
<i>Figur 11. Schema av hur kopplingen såg ut vid testning av B72220P3351K101 (MOV).</i>	17
<i>Figur 12. Schema av hur kopplingen såg ut vid testning av 1.5KE600CA(TVS-diod).</i>	17
<i>Figur 13. Schema av hur kopplingen såg ut vid testning av B72220P3351K101(MOV) och 1.5KE600CA(TVS-diod).</i>	17
<i>Figur 14. Implementerad krets i Altium Design. I schemat kan man se att ingången från solcellerna är J4-J6.</i>	18
<i>Figur 15. 3D vy av kretskortets framsida i Altium Design. Här visas b.l.a. 3D modellerna av MOV och TVS diod.</i>	19
<i>Figur 16. 3D vy av kretskortets baksida i Altium Design. Här kan vi se var ingången från solcellerna kopplas till J4-J6.</i>	19
<i>Figur 17. Fyra plottar av B72220P3351K101, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples.</i>	20
<i>Figur 18. Fyra plottar av 1.5KE600CA, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples.</i>	21
<i>Figur 19. Fyra plottar av B72220P3351K101 och 1.5KE600CA parallellkopplat, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples.</i>	22
<i>Figur 20. Alla tester kombinerade, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples.</i>	23
<i>Figur 21. Inzoomad bild på Figur 20.</i>	23
<i>Figur 22. Krets med resistansvärden utbytt mot komponentsymbol som ska visa de resistanserna i komponenterna då en hög transient går genom kretsen.</i>	26
<i>Figur 23. Alternativ design innehållande tre parallellkopplade metal oxide varistorer, en induktans och en parallellkopplad TVS diod.</i>	32
<i>Figur 24. SIMULINK modell av varistor kopplat till en spänningskälla för att simulera dess beteende.</i>	33
<i>Figur 25. V-I kurva för den simulerade varistor modellen.</i>	33
<i>Figur 26. SIMULINK modell av TVS Diod kopplat till en spänningskälla för att simulera dess beteende.</i>	34



<i>Figur 27. V-I kurva för den simulerade TVS diod modellen. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figur 28. SIMULINK modell där tre av de modellerade varistorerna är parallellkopplade och två av de modellerade TVS dioderna. Kretsen får en strömpuls på 10/20us. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figur 29. Resultat från testet i Figur 28 Översta plotten visar strömpulsen som skickades in i kretsen, mitten bilden visar den ström som går in i TVS dioderna och sista bilden visar spänningen över kretsen. ....</i>	<i>34</i>

## **Tabellförteckning**

<i>Tabell 1. Beskrivning av de ord som karakteriserar en MOV.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabell 2. Beskrivning av de ord som karakteriserar en TVS diod.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabell 3. Jämförelse utav de beskrivna komponenterna. ....</i>	<i>11</i>
<i>Tabell 4. Karakteristik av en B72220P3351K101.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabell 5. Karakteristik av en 1.5KE600CA.....</i>	<i>21</i>

## Notation

<b>Förkortning</b>	<b>Betydelse</b>	<b>Förklaring</b>
LIU	Linköpings Universitet	Linköpings Universitet
ISY	Institutionen för systemteknik	Linköpings Universitets institution för systemteknik för ingenjörer
SPD	Surge Protection Device	Generaliserad term för elektriska komponenter som skyddar mot överspänningar.
MOV	Metal Oxide Varistor	Elektrisk komponent som används som överspänningsskydd.
EMP	Electromagnetic Pulse	Kortvarig stark puls av elektromagnetisk energi
LEMP	Lightning Electromagnetic Pulse	Kortvarig stark puls av elektromagnetisk energi som kommer från åska
OC	Open Circuit	Öppen krets, innebär att det inte leder ström
SC	Short Circuit	Kortslutning, en väg utan resistans, alltså direkt kopplad
TVS	Transient Voltage Suppression	Dämpning av en transientspänning
LPZ	Lightning Protection Zones	Åskskydds zoner
LPL	Lightning Protection Level	Vilken åskskydds nivå ett åskskydd uppnår

# Introduktion

## 1.1 Motivering

Solar Bora är ett relativt nytt företag som har sitt arbetsområde och fokus på elproduktion med hjälp av solpaneler. De förser privatpersoner och företag med solpaneler och batterier för att kunna producera el till områden där det kan vara svårt att få tag på ett pålitligt elnät. De områden som Solar Bora oftast förser med sina solpaneler och batterier är till Afrika. Det ligger stor betydelse i att ha fungerande elnät och tillgång till el i Afrika, som överallt annars i världen för att kunna röra sig framåt som ett samhälle och för att kunna överleva. Tillgängligheten till elnät har påverkan på saker så som att ha lysen i sitt hem för att kunna till exempel studera hemma eller laga mat på ett enkelt och effektivt sätt med hjälp av induktionsspisar [1].

## 1.2 Syfte

Eftersom Afrika är ett av de områden i världen där det förekommer mest åska så leder det till en oro för skador på komponenter vid nedslag av åskan. Eftersom Solar Boras arbete utgörs mycket vid användning av deras utrustning i Afrika så har de gett oss uppgiften att konstruera ett åskskydd. Deras komponenter kan maximalt klara av en spänning upp till 600V men kretsen drivs normalt på 200-360V likspänning, eftersom blixterna från åska når upp till i snitt 30 miljoner volt så behöver deras komponenter ett skydd som förhindrar att denna spänning uppnås för att skydda deras komponenter och för att säkerställa säkerheten vid användning. Värt att nämna är att i fallet då en blixtnär skulle ge en direkt träff eller inom för nära område så går det inte att skydda mot sådana enorma spänningar och strömmar. [2]

## 1.3 Frågeställning

Frågeställningen vi har framför oss är om vi kan konstruera ett åskskydd för Solar Boras utrustning för att säkerställa att ingen skada sker på kretsarna inom deras

system.

## **1.4 Avgränsningar**

Eftersom vi inte haft tillgång till lika höga spänningar och strömmar som riktiga pulser från åskan som teoretiskt sätt skulle kunna skapas så har inte våra testningar varit ideella. En blixtnedslag kan definieras med hjälp av svenska standarden, däremot så är värdena i denna standard för höga för att vi ska kunna uppnå dem med den tillgången vi har till utrustning. Det skulle inte heller vara möjligt att vidta tillräckliga säkerhetsåtgärder för att utföra dessa test. På grund av dessa begränsningar så har vi avgränsat vårt arbete till tester med mindre spänning och ström.

# Teori

## 2.1 Introduktion

För att kunna skapa ett bra skydd mot åska så krävs kunskap om hur transienter uppkommer och hur de olika överspänningsskydden fungerar, vilket vi kommer diskutera i detta kapitel.

## 2.2 Åska

Åska är ett naturligt fenomen som bildar högspänningstransienter som oftast varar kortare än 200 mikrosekunder [3]. Transienterna som uppkommer av åska kan uppnå så höga värden som 30 miljoner volt och 20 000 ampere [2], vilket utgör ett väldigt stort hot för elektriska komponenter. Endast några milli-joule kan skada komponenter vilket tydligt påvisar ett behov av skydd mot åska [4], eftersom en blixtnål kan nå 180 miljoner joule [2].

Det finns tre sätt som åska kan påverka komponenter, dessa tre är:

Moln till marken, moln direkt till komponent eller moln till moln. Moln till moln är den absolut vanligaste och kan utstråla enorma elektromagnetiska pulser som påverkar komponenter [5].

## 2.3 Elektromagnetisk Puls (EMP)

Det finns olika sorter av elektromagnetiska pulser (EMP) beroende vad källan av pulsen kommer ifrån, till exempel finns nukleär EMP (nuclear, NEMP), icke-nukleär EMP (nonnuclear, NNEMP) och blixtnål EMP (lightning, LEMP). [6]

En explosion skickar ut elektrisk energi från dess källa runt om sig och skapar höga transienter som kan nå upp mot flera tusentals volt som därmed skadar elektroniska komponenter i sin omgivning.

Elektromagnetiska pulser används bland annat inom militära områden för att kunna inaktivera fienders elektriska hjälpmedel, däremot sker oftast ingen skada mot människor eller annat organiskt liv. [7]

### 2.3.1 Lightning-EMP (LEMP)

LEMP är den sortens elektromagnetisk puls som skapas utav åska då den träffar direkt eller i närheten och kan orsaka skada på komponenter genom överspänningar som inte kan hanteras [8]. Det är i detta fall som en så kallad Surge Protection Device (SPD) kan skydda från de höga transienter som orsakas av blixtnedslaget elektromagnetiska puls [9].

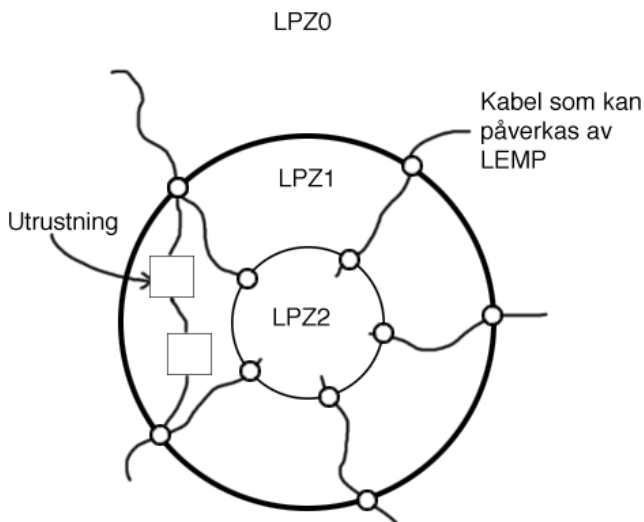
Transienten av en LEMP kan definieras enligt standarden IEC 61000-4-5 som två pulser [Puls stigtid/Puls falltid]:

- En OC spänningspuls, 1.2/50us, 4kV-2kV-1kV-0.5kV
- En kortslutnings strömpuls, 8/20us, 2kA-1kA-0.5kA-0.25kA

Denna karaktäristik är sättet som möjliggör testning av överspänningsskydd vid blixtnedslag. De olika spänning- och strömnivåerna kallas Lightning Protection Level (LPL) som är ett sätt att mäta hur bra åskskyddet är och definieras ofta i datablad till relevanta komponenter som testats enligt IEC 61000-4-5 [4]. Det finns också en vanlig 10/1000us puls men denna används mer inom telekommunikation.

## 2.4 Lightning Protection Zones (LPZ)

För att skapa ett så bra skydd mot åska som möjligt kan man använda flera olika metoder för att skydda på flera olika sätt. Dessa kallas åskskyddszoner (Lightning Protection Zones, LPZ) dessa zoner skyddar mot åska på olika skalor och kan delas in i två zoner, den yttre- och inre zonen.



Figur 1. Exempel på hur åskskyddszonerna struktureras.

### 2.4.1 Yttre zonen (LPZ0)

Detta är den yttersta zonen för åskskydd och arbetar för att ge hela området ett skydd mot åska, detta är den enda zonen som har möjlighet att skydda mot ett direkt åsknedslag. Denna zon fungerar så att den andra zonen kan hantera de effekter av nedslaget som blixten orsakar [4]. En vanlig metod för att skapa ett sådant skydd är att använda en s.k. faraday bur. Denna är tänkt att skydda så att åskan inte kommer in på området som behöver skyddas till att börja med.



## 2.4.2 Inre zonen (LPZ1 & LPZ2)

Den inre zonen kan även delas upp i ytterligare två zoner som fungerar liknande till hur den yttre zonen gör till den inre, alltså att den ena zonen minskar effekten så att den kan hanteras utav den andra. I dessa zoner används olika överspänningsskydd som fungerar bäst mot de transienter som orsakas av åsknedslaget puls [4]. Dessa överspänningsskydd ska placeras vid utgångar och ingångar från respektive zon (se Figur 1).

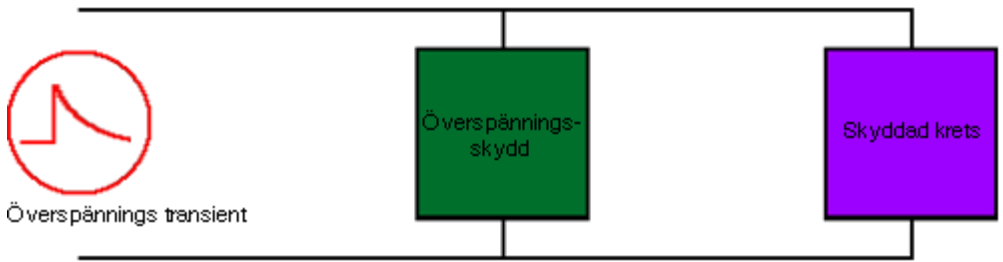
## 2.5 Surge Protection Device (SPD)

Surge Protection Device (SPD) är det engelska ordet för överspänningsskydd och kan också benämnas som Transient Voltage Surge Suppressor (TVSS). Dessa används för att skydda en krets från överspänning och kan fungera för både AC och DC spänning, en förenklad bild på hur ett överspänningsskydd kan implementeras kan ses i Figur 2. Det finns flertalet olika sorters skydd som nedan ska diskuteras [11]. Det viktiga när man skapar en krets som inkluderar överspänningsskydd är att skyddet inte påverkar resten av kretsen. Det är också viktigt att överspänningsskyddet kan klara av en sådan stor transient som ett blixtnedslag orsakar och inte går sönder. Skyddet ska klara av att skydda kretsen från flera blixtnedslag och inte bara ett, det går hursomhelst inte att skydda en hur hög överspänning som möjligt. Det finns två etablerade sätt att hantera höga transienter:

- Dämpa transientens spänning och blockera den från att gå vidare i kretsen
- Leda den höga strömmen bort från komponenterna

För att dämpa de högfrekventa spänningarna är det vanligaste sättet att använda sig utav lågpassfilter i serie eftersom de lågfrekventa och förväntade spänningarna kan fortsätta som normalt [3]. Problemet med användningen av lågpassfilter är att transientens egenskaper måste vara kända vid konstruktion och därav måste värdena antas.

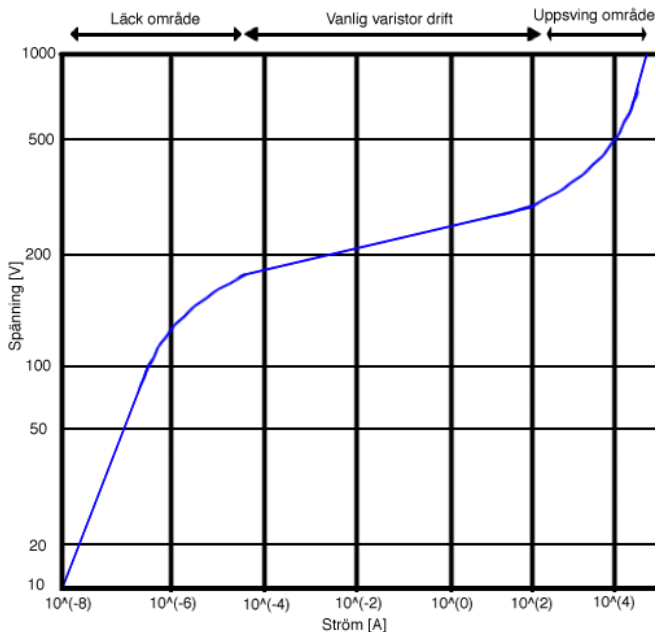
För att leda bort stora transienter kan man använda komponenter som begränsar spänning eller en s.k. crowbar komponent [3]. En crowbar komponent har fått sitt namn utifrån dess funktion då den vid vanliga spänningar har, idealt, en resistans som går mot oändligheten (eller väldigt högt) och då spänningen stiger över ett visst tröskelvärde så går resistansen, idealt, mot noll så att strömmen tar den vägen och därav kortsluts till jord [11].



Figur 2. Simplifiering av hur ett överspanningsskydd fungerar.

### 2.5.1 Metal Oxide Varistor (MOV)

MOV som är en förkortning för Metal Oxide Varistors är en slags diskformad SPD som är gjord av zinkoxid. Beroende på hur stor en MOV är så kan den hantera olika storlekar av överspänningar och transienter. Vanligtvis brukar de kunna hantera spänning mellan 30V och 1.5kV som den reagerar på bara några nanosekunder. Vid normal spänning så har en MOV väldigt hög resistans för att strömmen ska kunna som vanligt gå in till systemet. Vid en för hög spänning eller inkommande transienter så kommer MOV:en att minska sin resistans och eftersom ström alltid kommer gå den lättaste vägen så kommer strömmen röra sig genom MOV:en ner till jord [3]. Detta beteende kan ses i Figur 3.



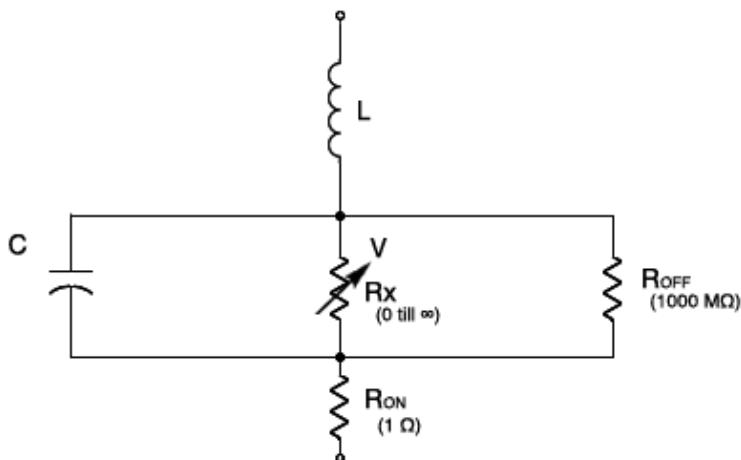
Figur 3. Ungefärligt beteende av en MOV, där resistansen vid läck området är 1-10Ω och 100MΩ vid uppsving området. Vid den vanliga driften är resistansen adaptiv.

En MOV karaktäriseras genom olika värden [12]:

Maximal AC spänning	Den kontinuerliga AC-spänningen som komponenten klarar av utan att gå sönder.
Maximal DC spänning	Den kontinuerliga DC-spänningen som komponenten klarar av utan att gå sönder.
Varistor spänning (Min/typ/max)	Ett intervall av värden på spänningar som varistorn leder vid aktivt läge.
Ström puls	Den strömmen som komponenten kan motstå utan att gå sönder under en kort tid.
Energi	Energien i Joule som komponenten klarar av.
Kapacitans @ frekvens	Kapacitansen i komponenten vid en viss frekvens.
Drifttemperatur	Ett intervall av temperaturer som komponenten är anpassad för.

Tabell 1. Beskrivning av de ord som karaktäriserar en MOV.

Som det syns i Figur 4 innehåller varistorn en kapacitans, i en likströms krets kan en högre kapacitans vara bra eftersom varistorn då kan ha två funktioner. Dämpning och kortslutning, istället för endast kortslutning. I en växelströms krets kan detta ha en negativ effekt på omkringliggande krets [13].



Figur 4. Exempel på ekvivalent kretsschema av en MOV.

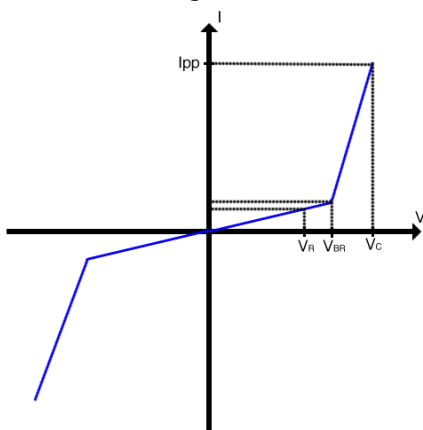
## 2.5.2 TVS Diod

Transient Voltage Suppressor (TVS) diod kan vara symmetrisk, eller bidirektionell, vilket betyder att den hjälper mot positiva- och negativa spänningar. Denna diod arbetar för att begränsa den inkommande spänningen men har en 'breakdown' spänning som alltså är en spänning som är för hög för att hantera, så då börjar den leda. Problemet med dessa dioder är dess sätt att avleda energi vilket kan orsaka komponenten att bli varm. Det som gör TVS dioden bra för att hantera åsknedslag är dess snabba responstid, responstiden är den snabbaste utav de andra alternativen för överspänningsskydd och reagerar på pikosekunder [3].

En TVS diod karaktäriseras genom olika värden [14]:

Reverse Standoff Voltage	Den maximala kontinuerliga spänningen som dioden kan klara av utan att börja leda.
Breakdown Voltage (Min/Max)	Det område som dioden börjar leda.
Maximum Clamping Voltage @ Ipp	Den spänningen som dioden hanterar vid högsta möjliga strömpuls.
Maximum Peak Pulse Current	Den högsta strömpulsen som dioden klarar av utan att riskera skada.
Maximum Peak Power	Den högsta effekten som dioden klarar av utan att riskera skada.
Drifttemperatur	Ett intervall av temperaturer som komponenten är anpassad för.

Tabell 2. Beskrivning av de ord som karaktäriserar en TVS diod



Figur 5. Ungefärligt beteende av en symmetrisk TVS diod

### 2.5.3 TVS Tyristor

Transient Voltage Suppressor (TVS) tyristor är en symmetrisk komponent vilket betyder att de reagerar likadant mot positiva såväl som negativa spänningar. Till skillnad från TVS dioder så är tyristorn en s.k. crowbar komponent och kortsluter alltså höga positiva eller negativa spänningar så de inte når resterande komponenter, och begränsar alltså inte spänningen utan kortsluter den helt. Dessa tyristorer används oftast inom telekommunikationen som överspänningsskydd på grund av deras snabba responstid tillsammans med dess höga kapacitet att skydda mot stora transienter. Denna tyristor används oftast inte i likströmskretsar eftersom de inte alltid lyckas återgå till normalt läge efter den aktiverats. TVS Tyristor går inte sönder men om den utsätts för mycket hög spänning kan den misslyckas att kortsluta vid transienter. [3]

### 2.5.4 Gas Discharge Tubes (GDT)

Gas Discharge Tubes, förkortat till GDT, fungerar så att vid en för hög spänning så blir gasen inuti denna SPD joniserad vilket gör att den leder strömmen väldigt bra. Gasen joniseras typiskt vid 500V. Den används på det sättet att när det väl kommer en för hög spänning så kommer strömmen att ledas genom GDTn bort från systemet ner till jord eftersom den har bästa ledning när gasen antänts. Eftersom antändningen kan ta flera mikrosekunder i GDTn så kan det hända att transienter hinner leda sig till andra komponenter vilket kan skada systemet. [3]

## 2.5.5 Jämförelse av komponenter

Här listas alla olika överspänningsskydd i komponenterna med deras nackdelar och fördelar för att få en överblick om komponenternas egenskaper [3].

Typ av skydd	Fördelar	Nackdelar
MOV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Klarar av hög ström</li> <li>- Brett strömspektrum</li> <li>- Brett spänningsspektrum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gradvis degradering</li> <li>- Hög spänningsbegränsning</li> <li>- Hög kapacitans</li> </ul>
TVS diod	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Låg spänningsbegränsning</li> <li>- Degraderas inte</li> <li>- Brett spänningsspektrum</li> <li>- Väldigt snabb svarstid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Begränsad strömpuls skydd</li> <li>- Hög kapacitans vid lågspännings komponenter</li> </ul>
TVS tyristor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Degraderas inte</li> <li>- Väldigt snabb svarstid</li> <li>- Hög strömbehandling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Återställs inte vid kontinuerlig DC spänning</li> <li>- Kort spänningsspektrum</li> <li>- Fördröjd avstängning</li> </ul>
GDT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Klarar av hög ström</li> <li>- Låg kapacitans</li> <li>- Hög insulerings resistans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Väldigt hög spänning krävs</li> <li>- Begränsad livstid</li> <li>- Långsam svarstid</li> <li>- Återställs inte vid kontinuerlig DC spänning</li> </ul>

Tabell 3. Jämförelse utav de beskrivna komponenterna.

## 2.5.6 Faraday Cage

En Faraday bur är en inhägnad som består av ledande metaller som förhindrar utomstående elektriska fält att komma in eller att komma ut genom inhägnaden.

Den ledande metallen som omsluter inhägnaden är neutralt laddad, alltså lika många positiva som negativa laddningar vilket också är vad den alltid kommer sträva efter. Vid ett blixtnedslag så kommer ledaren att få ett överflöd utav negativa laddningar vilket kommer göra att de negativa laddningarna kommer röra sig mot jord för att balansera ut de positiva och negativa laddningarna. Med andra ord kommer en Faraday bur att skapa en enkel väg för elektroner att röra sig mot jord vilket kommer blocka ut de effekter en LEMP skulle haft på insidan av buren. [15]

## 2.5.7 Ekvationer

### **Effekt**

$$P = U * I$$

Ekvation 1. formel för effektuträkning.

### **Spänningsdelning**

$$U_2 = U_1 * \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

Ekvation 2. Formel för uträkning av spänningsdelning.

### **Seriekoppling av kondensatorer**

$$C_{tot} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

Ekvation 3. Formel för uträkning av seriekopplade kondensatorer.

### **Akkumulerad Summa Joule**

$$W = \sum P * dt$$

Ekvation 4. Formel för uträkning av totala energin.

### **Uträkning av energi från spänningsförändring**

$$dW = 1/2 * C * (V_1^2 - V_2^2)$$

Ekvation 5. Formel för uträkning av Joule utifrån en förändring av spänningen.

### **Strömdelning**

$$I_X = I_{tot} * \left( \frac{R_{tot}}{R_X + R_{tot}} \right)$$

Ekvation 6. Formel för strömdelning, där  $I_x$  är den beräknade strömmen  $I_{tot}$  den totala strömmen.

### **Beräkning av induktans**

$$L = \frac{V}{\left( \frac{di}{dt} \right)}$$

Ekvation 7. En ekvation för att beräkna induktansen utifrån spänningen samt förändringen i ström.

# Metod

## **3.1 Intro**

På grund av fokuset av arbetet samt placering av objektet som ska skyddas kommer endast en SPD konstrueras och inte något yttre skydd som en faraday bur eftersom det skåp som kretskorten ligger i agerar som en sorts faraday bur.

## **3.2 Förundersökning**

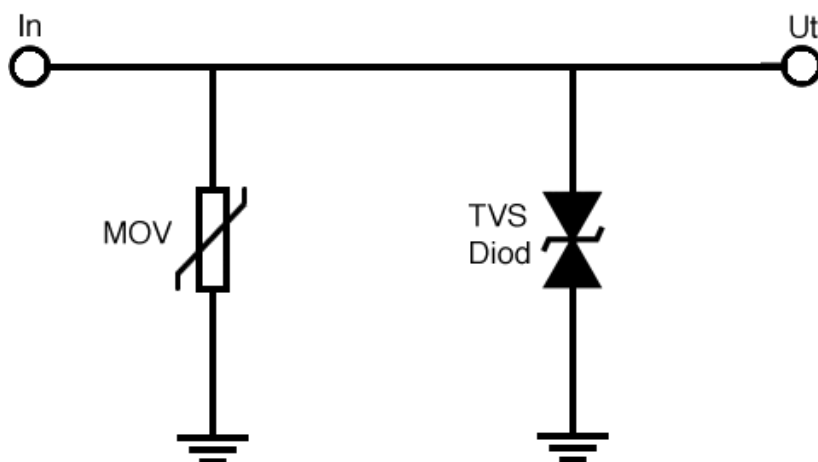
I detta projekt är förundersökning väldigt viktigt eftersom det krävs förståelse kring fysiken av åsknedslag och hur dess påverkan är på komponenter. När en grundläggande förståelse kring åska har nåtts så kan instudering av skydd mot åska påbörjas. Vid detta tillfälle finns en förståelse av problemen som orsakas utav åska och det är därav lättare att förstå vad som krävs för att skydda emot det. För att hitta relevanta metoder som passar in till det som är intressant är de akademiska databaser som LIU:s bibliotek har tillgång till en rimlig källa. Vid dessa databaser är tidigare arbeten och forskning kring ämnet relevanta källor.

Efter en inlärnig av åska, dess problem och lösningar till dessa problem funnits kan ytterligare undersökning påbörjas, denna gång i form av de komponenter som kan användas i konstruktionen. Vid detta tillfälle kan även designer över kretsschemat som ska skapas påbörjas, detta kommer ske i programmet Altium eftersom det är vad Solar Bora och majoriteten av företag använder sig utav. Nu måste de olika komponenterna jämföras och se vilka som kan anpassas bäst till det relevanta projektet, detta kan göras genom att jämföra de olika komponenternas datablad och se om deras kvalifikationer överensstämmer med kraven för projektet. När en slutsats nått om vilka komponenter och vilken design som ska användas kan dessa beställas. En rimlig metod är att beställa komponenter först så att de kan testas i verkligheten, rimligtvis beställs olika versioner av komponenterna så den bäst anpassad till projektet kan användas. Därefter bör undersökning kring kretsens placering i relation till resterande kretsar påbörjas.



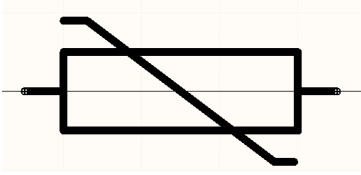
### 3.3 Design

I kapitel 2.5.5 jämfördes alla relevanta komponenter och enligt de specifikationer som behöver mötas är MOV och TVS dioden de mest passande till arbetet eftersom arbetet kommer ske på en krets som är likström vilket dessa är kompatibla med. En MOV klarar av höga strömmar och spänningar vilket är essentiellt för skydd mot blixtnedslag. En TVS-diod har en snabb reaktionsförmåga vilket också är viktiga för att förhindra att någon transient hinner förbi skyddet innan de har börjat leda. Detta bör då ge ett heltäckande skydd för stora kretsen. Designen som konstruerades kan ses i Figur 6.

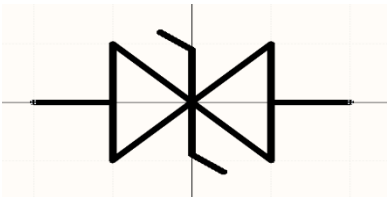


Figur 6. Design

Vid val av specifikationer på komponenterna var det viktigt att ha en del saker i åtanke. Dessa var den kontinuerliga spänningen som går genom kretsen, alltså den spänning som komponenten kan klara av utan att brinna upp eller att aktiveras. Detta är viktigt eftersom det förhindrar komponenter från att påverka utomliggande krets. Det är även viktigt att kolla upp vilken spänning som komponenten begränsar till vid en specifik ström och vice versa. Detta görs för att kunna säkerställa att komponenten inte låter en för hög spänning gå genom kretsen. Utifrån en kombination av dessa kan man då välja att den kontinuerliga spänningen som komponenten är så låg som möjlig men ändå kan utså den kontinuerliga spänningen i kretsen, därefter kan man se vilken spänning som komponenten kan begränsa till vid en hög ström. När man har listat ut det så kan man därefter behöva parallellkoppla komponenterna om de värden som den begränsar till fortfarande är för höga. I vår krets är den kontinuerliga spänningen mellan 200-360V från ingången, alltså solcellerna, vilket betyder att vi ska välja ett värde som är så nära 360V som möjligt.



Figur 7. Metal Oxide Varistor symbol skapad i Altium



För att kunna implementera kretsen i Solar Boras system så används programmet Altium där vi även skapade PCB-designen. I programmet finns det redan stora bibliotek på komponenter som innefattar många olika TVS-dioder och MOV:ar, däremot så fanns inte just de modeller som används för detta projekt med i biblioteket. För att kunna använda dessa specifika komponenter så måste deras specifika EDA-modeller laddas ner från hemsidan [Ultralibrarian.com](http://Ultralibrarian.com) och importeras till Altium. Dessa modeller kan ses i Figur 7 för MOV:en och Figur 8 för TVS-dioden.

### 3.4 Testning

Eftersom vi inte kunde uppnå den höga strömmen ur IEC 61000-4-5 gjorde vi en generalisering av testningen genom att använda en kondensator. Genom att ladda upp en kondensator med spänning och sedan kortsluta mot komponenterna så kan man imitera karakteristiken av en LEMP, fast med mycket längre transient än i standarden. Detta test hjälper alltså till att förstå funktionen av komponenterna, eftersom vi även sparar mätningarna på de olika komponenterna som sparas och

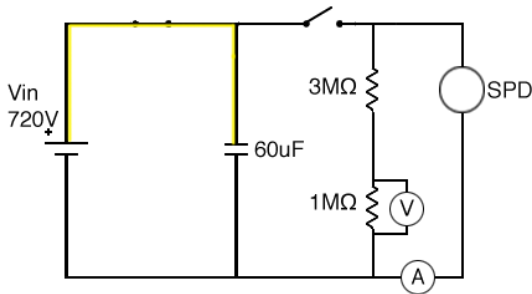
Figur 8. Transient Voltage Supression Diode symbol skapad i Altium.  
jämförs genom att skapa plottar i programmet MATLAB.

För att se vilka komponenter som kommer fungera bäst kommer det beställas ett flertal olika komponenter vars funktion testas. I labbet finns tillgång till 720V kontinuerlig spänning. Däremot så klarar oscilloskopet som används endast spänningar upp till 300V. Detta gick att lösa genom att spänningsdela spänningen genom att seriekoppla fyra 1M $\Omega$  resistanser enligt Ekvation 2, varav de första

tre blir R1 och den sista R2. Mätningen sker över den fjärde resistorn, R2. Spänningen blir en fjärdedel av 720V vilket gör det möjligt för oscilloskopet att kunna mäta spänningen.

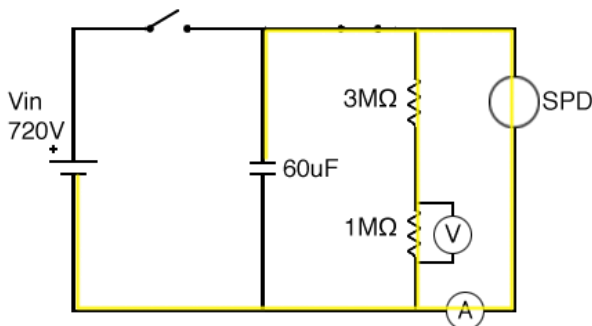
$$U_2 = U_1 * \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

### Laddar kondensatorn



Figur 9. Krets som visar hur det gick till att ladda kondensatorn. Eftersom komponenterna ska skydda mot transienter och inte kontinuerlig ström

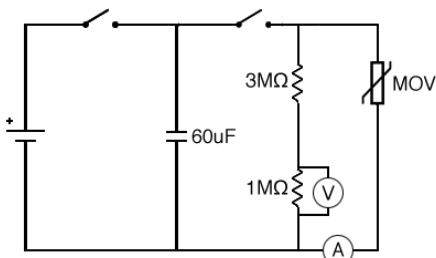
### Kortslutning mot SPD



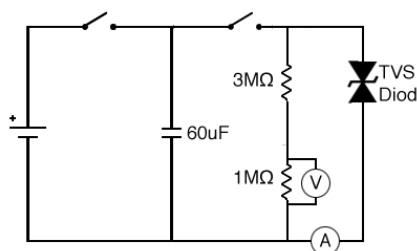
Figur 10. Krets som visar hur det gick till att kortsluta kondensatorn mot resterande krets. så laddas en kondensator upp till hög spänning enligt Figur 9 och sedan kortsluts mot komponenterna som i Figur 10.

Vi testade först att kortsluta våra komponenter var för sig för att säkerställa att de fungerade och för att se på oscilloskopet hur de beter sig. För att mäta vilken ström som uppnås så har vi fått låna en "Rogowski Current Waveform Transducer" från Linköpings Universitet och även en shunt-resistor.

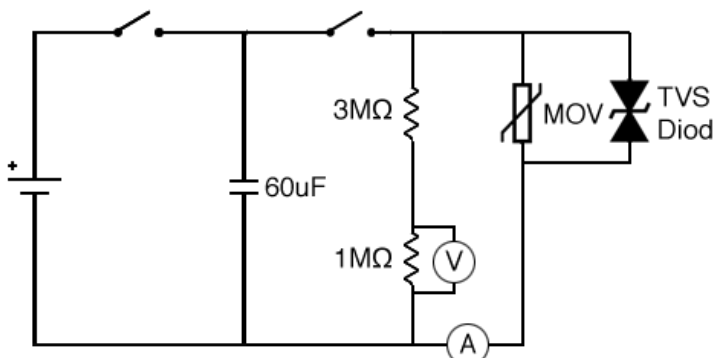
En shuntresistor är en resistor med väldigt låg resistans som ofta används för mätning av ström. Genom att koppla shuntresistansen i serie med våra skyddskomponenter så säkerställer vi att all ström går den väg våra skydd sitter. Eftersom vi vet att all ström kommer gå igenom shuntresistansen så kan vi med säkerhet mäta strömmen med hjälp av vår Current Waveform Transducer. Vi kan se nedan i Figur 11 hur test-kretsen var uppkopplad för vår MOV och vi kan se i Figur 12 hur test-kretsen var uppkopplad för vår TVS-diod. När vi testat båda komponenterna så fortsätter vi med att parallellkoppla dioden och MOV:en enligt schemat Figur 13 och utföra samma tester för att se karakteristiken i oscilloskopet. Alla tester som utförts har från oscilloskopet sparats med ett USB och importerats in till MATLAB för att kunna studera graferna med större noggrannhet.



Figur 11. Schema av hur kopplingen såg ut vid testning av B72220P3351K101 (MOV).



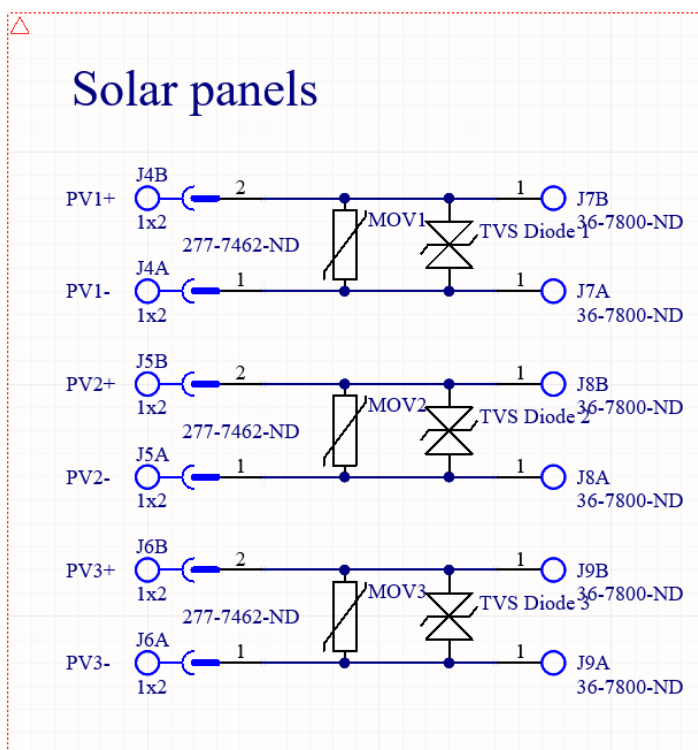
Figur 12. Schema av hur kopplingen såg ut vid testning av 1.5KE600CA(TVS-diod).



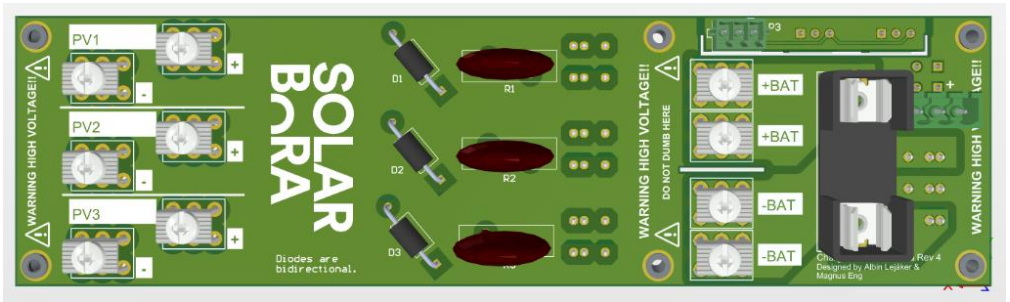
Figur 13. Schema av hur kopplingen såg ut vid testning av B72220P3351K101(MOV) och 1.5KE600CA(TVS-diod).

### 3.5 Implementering

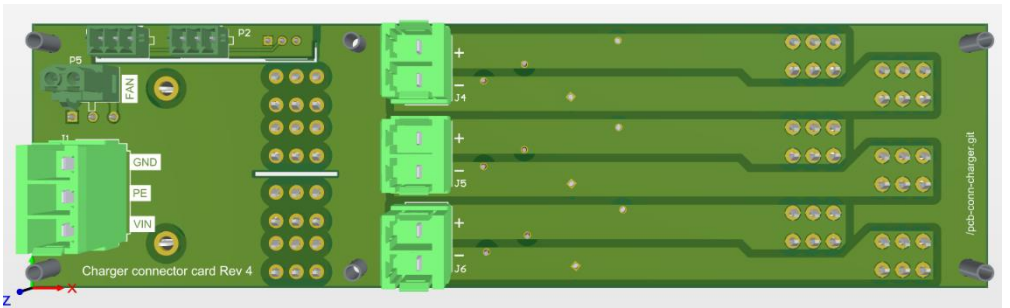
Efter lyckad testning bör all kunskap för att skapa en slutgiltig krets finnas. Då bör designen slutföras i Altium och implementeras in i resterande krets som ska skyddas. Efter importering av de komponenter som behövs i vår krets så implementerades vår krets in till Solar Boras schema mellan utgången på solcellerna och ingången för charger eftersom solcellerna sitter på utsidan och då kan transienter lätt ta sig in genom kablarna utifrån och in vid en LEMP. I Figur 14, Figur 15 och Figur 16 visas hur kretsen implementerades genom Altium.



Figur 14. Implementerad krets i Altium Design. I schemat kan man se att ingången från solcellerna är J4-J6.



Figur 15. 3D vy av kretskortets framsida i Altium Design. Här visas b.l.a. 3D modellerna av MOV och TVS diod.



Figur 16. 3D vy av kretskortets baksida i Altium Design. Här kan vi se var ingången från solcellerna kopplas till J4-J6.

# Resultat

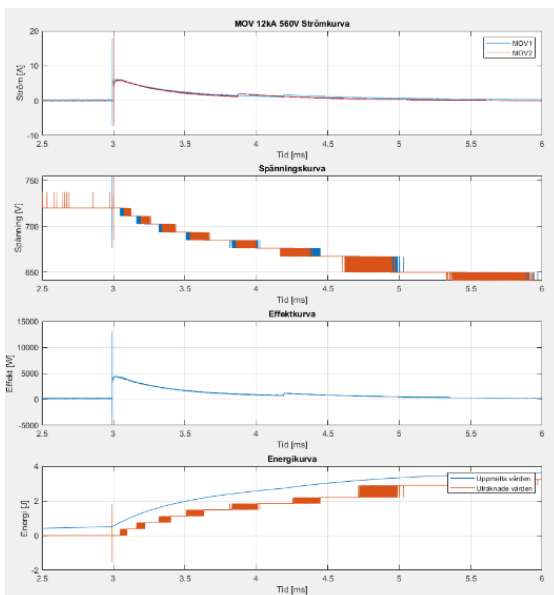
## 4.1 Test utav MOV i verkligheten

Komponenten som testats är en B72220P3351K101 med följande specifikationer:

Maximal AC spänning	350V
Maximal DC spänning	460V
Varistor spänning (Min/typ/max)	504V/560V/616V
Ström puls	12kA
Energi	335J
Kapacitans @ frekvens	900pF @ 1kHz
Drifttemperatur	-40°C ~ 105°C

Tabell 4. Karaktäristik av en B72220P3351K101.

Här visas de resultat som uppmäts vid test av en MOV, nedan i Figur 17. Fyra plottar av B72220P3351K101, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples. finnes de resultat kopplade till testmetoden som visas i Figur 11. I resultat plottarna så finns två kurvor, MOV1 och MOV2, som främst existerar för att visa lik- och olikheter i plottarna, de är samma MOV som testats två gånger om. I



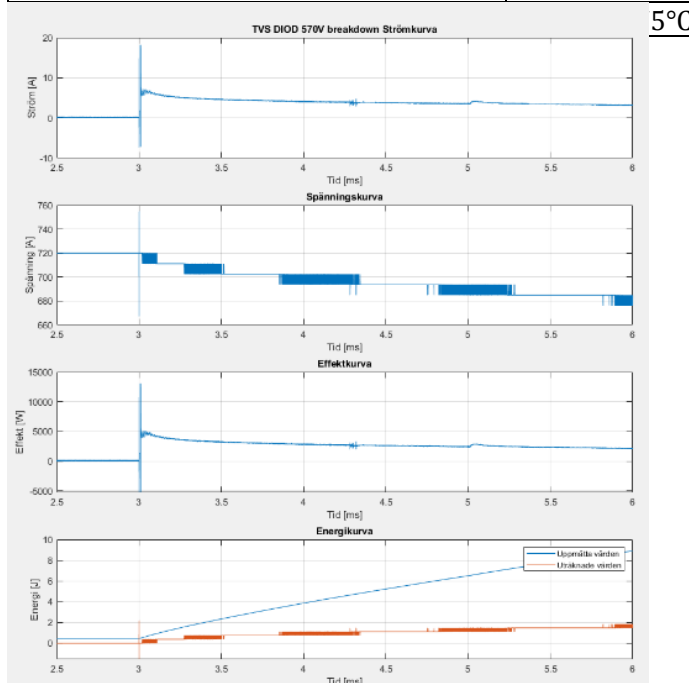
Figur 17. Fyra plottar av B72220P3351K101, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples.

energiplotten finns det en kurva för den uppmätta energin och en för den uträknade energin. Den uppmätta totala energin räknas ut genom att addera alla samples med de värden som effekten har under tiden för varje sample, se ekvation 4. I kurvan för uträknad energi räknas energin för spänningsförändringen vid kortslutningen, enligt ekvation 5.

## 4.2 Test av TVS Diod i verkligheten

Komponenten som testats är en 1.5KE600CA med följande specifikationer:

Reverse Standoff Voltage	512V
Breakdown Voltage (Min/Max)	570V/630V
Maximum Clamping Voltage @ Ipp	828V
Maximum Peak Pulse Current (10/1000µs)	2.5A
Maximum Peak Power	1.5kW

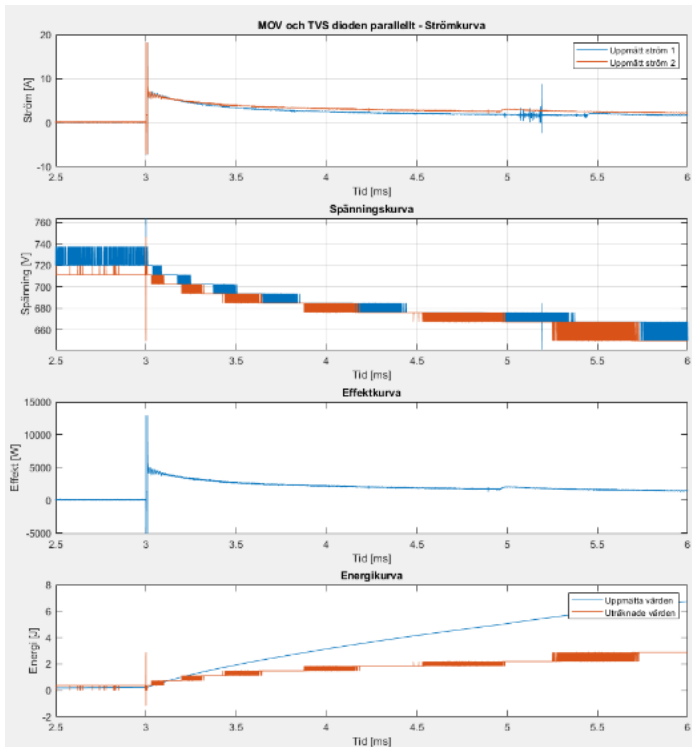


Figur 18. Fyra plottar av 1.5KE600CA, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples.

Tabell 5. Karaktäristik av en 1.5KE600CA.



Här visas de resultat som framkommit vid test av TVS dioden, nedan i Figur 18 syns de resultat från testmetoden enligt Figur 12.



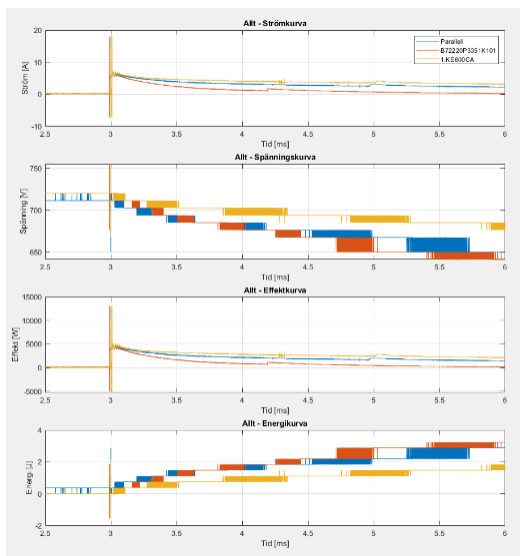
Figur 19. Fyra plottar av B72220P3351K101 och 1.5KE600CA parallellkopplat, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples.

### 4.3 Test av slutgiltig krets i verkligheten

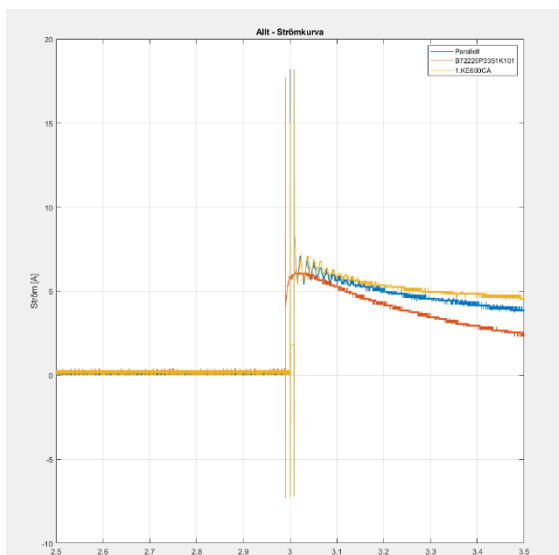
Här nedan i Figur 19 testas båda komponenterna parallellt enligt metoden i Figur 13. De två kurvorna Parallell1 och Parallell2 är endast för att visa olikheter i mätningarna men är plottar av samma komponenter.

## 4.4 Jämförelse

Nedan i Figur 20 visas alla plottar tillsammans så att de kan jämföras med varandra. I detta fall är Parallell den slutgiltiga kopplingen, B72220P3351K101 är MOV:en och 1.5KE600CA är TVS dioden. I Figur 21 är in zoomade varianter och används för att lättare se likheter bland kurvorna.



Figur 20. Alla tester kombinerade, importerat från ett oscilloskop till MATLAB med ungefär tre miljoner samples.



Figur 21. Inzoomad bild på Figur 20.

# Diskussion

## 5.1 Resultat

### 5.1.1 Strömkurvorna

Om man studerar strömkurvorna noga så når vissa värden noll och andra inte efter pulsen. I Figur 18 och Figur 19 blir strömmen aldrig noll vilket betyder att energin blir väldigt hög jämfört med där Figur 17 strömmen når noll. Detta är väldigt konstigt och beror på mätverktyget vi använde oss utav, Rogowski Current Waveform Transducer. Detta mätverktyg fungerar endast för växelström men ska kunna mäta transienter som vår, hursomhelst så blev strömkurvan för likström och då kunde inte mätverktyget korrekt mäta strömmen, det är hursomhelst inte säkert att strömmen efter pulsen skulle nått noll ändå eftersom en för kort tid var sparad. Därför är strömkurvorna inte pålitliga i mätningarna och anledningen varför det finns en uträknad energikurva. Det är fortfarande intressant att jämföra början av transienten eftersom den delen av kurvan klarade mätverktyget av, där kan vi även se att strömkurvan för TVS diod och parallellkoppling är väldigt lik men det kan bero på att strömkurvan för varistorn inte har ett tydligt mönster och att den parallellkopplade strömkurvans mönster antar det av TVS dioden. Det kan också bero på att TVS dioden aktiveras fullt och varistorn inte gör det. Eftersom kretsen just är parallellkopplad så betyder det att det sker en strömdelning vilket möjligtvis orsakar varistorn att inte nå uppsving området utan stannar kvar i den vanliga varistordrift området och den adaptiva resistansen alltså inte blir så låg som vid det egna testet.

### 5.1.2 Spänningskurvorna

De värdena som importerades från oscilloskopet var tvungna att justeras för att visa sina riktiga värden på grund av den spänningsdelning vi gjorde för att inte skada mätsystem. Vi spänningsdelade enligt Ekvation 2 så att den spänning vi mätte blev en fjärde del av den ursprungliga spänningen, vilket betyder att vi multiplicera de importerade värdena med fyra. Detta visade sig dock inte vara

tillräckligt eftersom det startvärde på 720V vi visste vi hade istället visade sig som 656V i grafen. Det beror på att oscilloskopet vi använde även har en inre resistans som vi glömt räkna med, men eftersom vi visste om vår inspänning kunde vi räkna ut resistansen för oscilloskopet genom att bryta ut värdet för  $R_1$  i Ekvation 2. Då kunde vi räkna ut att resistansen för  $R_1$  blev  $3.3902M\Omega$  och inte  $3M\Omega$  som först tänkt. Oscilloskopets resistans är då alltså  $0.3902M\Omega$ . När vi kunde allt detta var det därför lätt att veta hur mycket vi skulle multiplicera den importerade spänningen med 4.3902.

### 5.1.3 Effektkurvorna

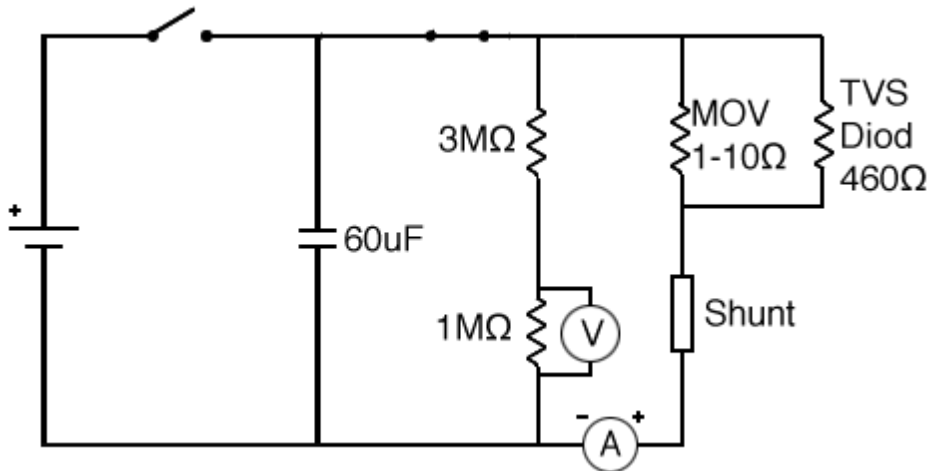
Effektkurvan är en kombination av ström- och spänningsvärdena och på grund av de felaktiga strömvärdena så går effektkurvan inte att lita på.

### 5.1.4 Energikurvorna

Genom att räkna ut den ackumulerade energin kunde vi se hur mycket energi som krävs för att dämpa den inmatade transienten. På mätningarna visas två kurvor för energin, en uppmätt kurva och en beräknad kurva. Den uppmätta kurvan är beräknad ifrån effektkurvan vilket är beräknad av de två uppmätta ström- och spänningskurvorna. På grund av opålitligheten i den uppmätta strömkurvan för två av plottarna var det bättre att göra en beräknad energikurva endast baserad på spänningskurvan som är mer trovärdig. Detta gjorde vi genom Ekvation 5. Formel för uträkning av Joule utifrån en förändring av spänningen. och fick därifrån ett mycket trovärdigare svar. I Figur 17 var strömkurvan trovärdig och därav fick vi den mest rätta energikurvan därifrån och detta kan vi se genom dess likhet till den beräknade energikurvan. Den enda skillnaden i de två kurvorna är att den beräknade energikurvan hamnar lite lägre än den uppmätta, vilket är på grund av den uppmätta energikurvan inkluderar energi innan själva testet påbörjats och om man bortser från de värden så blir kurvorna väldigt lika. De uträknade kurvorna är alltså mer precisa eftersom fram till tre millisekunder bör energin vara noll eftersom strömmen ska vara det, i uppmätningen finns blir det ju inte så (pga. Ej ideella mätverktyg) och energin under den tiden räknas med.

I energitesterna för TVS diod och parallellkopplingen ser vi att de beräknade energikurvorna inte är lika alls jämfört med de uppmätta. Detta förklaras i 5.1.1 Strömkurvorna. Vi valde därför att endast ha med de beräknade energikurvorna i

slutgiltiga jämförelsen eftersom de är mest lika verkligheten. I Figur 20 kan vi se att varistorn använder mest energi men sänker även spänningen absolut snabbast, därav följer den parallella kopplingen som, ganska väntat, hamnar mellan varistor och dioden. Vid en större transient tror vi att varistorn skulle tagit över en stor del av arbetet för att sänka spänningen eftersom den då skulle nått uppsving området och fått en lägre adaptiv resistans. Vid en större transient kan man tänka sig att kretsen skulle kunna representeras av Figur 22.



Figur 22. Krets med resistansvärden utbytt mot komponentsymbol som ska visa de resistanserna i komponenterna då en hög transient går genom kretsen.

Figur 22 är en representation av hur kretsen skulle fungera då en större transient gick in i kretsen än den vi testade. I detta fall skulle MOV:en reagera mer eftersom den skulle nå en mycket lägre resistans än vad TVS dioden skulle, detta kan vi se inte hända i resultaten eftersom det endast räcker för varistorn att begränsa spänningen lite och därav ha en mer adaptiv resistans än när den var själv i kretsen, detta kan man se i Figur 20 eftersom kurvan för den parallella kretsen sjunker snabbare än när TVS dioden var ensam.

För att få en verklighetssyn på våra tester jämförde vi med IEC 6100-4-5 [4] men för att göra det behöver vi räkna ut den energitålighet som krävs för att dämpa. Detta kan vi göra för strömpulsen genom att använda den 8/20us pulsen tillsammans med den tillhörande LPL strömmen för att räkna ut laddningen och sedan multiplicera med den spänning definierad i databladet för medelspänningen för respektive komponenten.

Standard strömpuls LEMP (8/20 us) vid 910V enligt datablad för MOV	
Lightning Protection Level 1 (0.25kA)	3.18J

Den enda komponent vi kan räkna ut ungefärliga energitåligheten för är då strömpulsen går genom vår MOV. Energin för standard strömpulsen är ganska lik den som vi mätte upp, däremot har standardpulsen högre ström. Energin blir alltså samma eftersom vår mätning är gjort med en låg ström under lång tid och den pulsen i standarden är gjort på en hög ström under kort tid, vilket gör det rimligt att totala blir samma.

Våra tester är dessutom testade vid en relativt låg ström där kondensatorn agerar som en sorts spänningskälla och strömmen därav bestäms utifrån resistansen från våra komponenter. I den svenska standarden så agerar testpulsen istället som en sorts strömkälla och spänningen bestäms därav utifrån resistansen i komponenterna. Detta gör en ganska stor skillnad på resultatet eftersom enligt databladet för vår MOV så blir spänningen som den begränsar till 910V då kretsen känner av 100A, alltså mycket högre en den högsta spänning på 600V som vårt skydd inte ska överstiga [12]. Detta upptäckte vi i slutet av arbetet och det kommer därför diskuteras mer i 5.5 Framtida arbete.

## 5.2 Metod

Eftersom vi hade två spänningskällor med 360V vardera så kunde vi ladda upp en kondensator med 720V genom att köra dem i serie. Vi hade tekniskt sätt möjlighet att seriekoppla fler kondensatorer för att komma upp i ännu högre spänningar med tanke på att vi beställde tre. Men våra mätinstrument klarade max upp till 1000V och 300A så vi hade inte möjligheten att gå upp i så höga transienter utan att skada mätinstrumenten. Iså fall hade vi kunnat komma upp i spänningarna 1440V och 2160V enligt Ekvation 3 för kondensatorer seriellt.

$$C_{tot} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots + \frac{1}{C_N}$$

Om vi haft mätinstrument som klarade de spänningarna så skulle vi endast kunna testa transienter mot vår MOV ensam eller vår MOV och TVS-diod parallellkopplade eftersom TVS-diodens maxspänning är 828V. Vi kunde dock inte säkerställa att

ingen person eller utrustning kom till skada om vi skulle öka transienterna eftersom vi inte var i ett labb gjort för att testa högre strömmar.

Med hjälp av spännings- och strömvärdena kunde vi räkna ut effekten och därmed även plotta den för alla tester. Vilket medför att vi sedan kunde räkna ut den ackumulerade energin under testerna. Detta gör vi genom att summera alla effektvärden och sedan multiplicera det med sampletiden, som i vårt fall var 2 nanosekunder. Detta enligt Ekvation 4.

$$W = \sum P * dt$$

Altium användes för att skapa kretsschema och 2D-modell på vår krets. Användningen av Altium var relativt smidig eftersom det var ett program vi inte använt förut. Som tur var kunde vår handledare på Solar Bora hjälpa oss mycket med Altium eftersom det är vad de använder på företaget vilket gjorde det lättare att snabbare bli klar med de sista stegen i vårt arbete.

Kretsen placerades vid ingången från solcellerna till batterierna enligt teorin kring åskskyddszonerna eftersom solcellerna sitter på utsidan och effekterna av ett åsknedslag kan därmed ledas in till kretsen genom kablarna från solcellerna till batteriet. Överspänningsskyddet bör nu förhindra att dessa transienter når de sköra kretsarna.

### **5.3 Etik**

Den effekten som ett fungerande åskskydd på Solar Boras solcellssystem kommer att ha är att de byar som använder systemet, som främst är i Afrika, kommer att få en mer pålitlig tillgång till elektricitet. Eftersom de flesta byar som använder detta system tillhör den kontinent som har allra mest åskoväder är det en större risk att åskan påverkar deras vardag. Enligt teorietik så är vår konstruktion etiskt bra eftersom vår intention är att slutligen förbättra deras levnadsstandarder och eftersom det generellt bidrar till att förbättra deras liv är det etiskt bra.

Det åskskyddet vi gör har syfte att skydda komponenter från att förstöras och tekniken kan till vår förståelse inte användas till något oetiskt. Om man även kollar lite bredare på företaget i sig så kommer vi fram till samma slutsats, vi kan inte

hitta något som skulle kunna tolkas som oetiskt, då företaget ger tillgång till förnyelsebar energi till behövande platser.

## **5.4 Slutsats**

För att svara på frågeställningen:

- Kan vi konstruera ett åskskydd för Solar Boras utrustning för att säkerställa att ingen skada sker på kretsarna inom deras system.

Vi har kunnat konstruera och implementera ett överspänningskydd som är kapabel till att skydda mot den puls som vår kondensator kunnat leverera. Detta gjorde vi för att bevisa komponenternas funktion samt för att få en bättre förståelse av hur de funkar och att de är kompatibla inom den krets som de ska implementeras i. Arbetet har inte kunnat säkerställa att ingen skada sker på kretsarna inom deras system eftersom testerna har skett med alldeles för låg ström som inte uppnår standarden IEC 61000-4-5. Vi diskuterar därav i 5.5 Framtida arbete hur detta bättre skulle lösas för att kunna säkerställa att skyddet fungerar.

Vi har fokuserat på att endast skydda de kretsar i systemet och inte något ytligt som själva solcellerna eftersom det skulle kräva ett större arbete och en större kostnad. Vi har dock diskuterat hur det skulle kunna göras genom en faraday bur.

## **5.5 Framtida arbete**

Eftersom vår krets inte är testad gentemot högre strömmar så har allt fungerat som tänkt, men om vi skulle utsätta skyddskretsen mot en högre ström som den puls i LPL4 alltså med amplitud 250A så kommer inte våra komponenter begränsa ner till under 600V som vi tänkt eftersom det är spänningen den begränsar till då den upplever 1mA. Om den får 100A kommer den istället begränsa ner spänningen till några hundra volt över den nivå vi skyddar emot, vilket är mycket högre än vad komponenterna klarar av [12].

### **5.5.1 Alternativ krets**

För att lösa detta problem skulle vi då istället behöva parallellkoppla varistorer så att strömdelningen blir så liten för varje varistor så att den känner av 1mA då den totala strömmen är 100A. Detta skulle teoretiskt enligt Ekvation 6. Formel för



strömdelning, där  $I_x$  är den beräknade strömmen  $I_{tot}$  den totala strömmen. leda till att ungefär 100 000 varistorer av samma specifikation sattes parallellt, vilket är orealistiskt. En annan mer realistisk lösning skulle vara att välja en annan varistor, till exempel en B72220P3271K101 kunna användas. Skillanden med denna MOV är att den har en lägre kontinuerlig spänning, alltså närmare till den i kretsen. Denna skulle då istället begränsa spänningen ner till  $430V \pm 10\%$  då strömmen i varistorn är 1mA och 710V vid 100A [12]. Detta är fortfarande över specifikationen på 600V men ett realistiskt antal varistorer skulle tänkas parallellkopplas för att komma under 600V. Problemet med denna varistor är att eftersom vi sänker begränsningsspänningarna sänker vi även den kontinuerliga likströmsspänning som varistorn är anpassad för,  $V_{DC}$  för den nya varistorn är 350V. Det väcker ett problem vi inte behövt ha i åtanke innan vilket är att  $V_{DC}$  är mindre än 360V. Trots detta bör kretsen inte påverkas av eftersom  $P_{MAX}$  inte får vara mer än 1W vilket inte uppnås vid 430V och 1mA utan det är ganska långt ifrån vid 430mW. Om det skulle komma en åskstöt då tre av dessa varistorer är parallellkopplade skulle strömmen för varje MOV bli lite mindre än 100A i varje varistor vilket skulle leda till en spänning under 710V, vilket TVS dioden nu skulle kunna hantera.

En förbättring av kretsen för att få den att fungera som tänkt vore att lägga till en induktor mellan de parallellkopplade komponenterna. Detta skulle skilja arbetet från varistorn till TVS dioden så den agerar som ett andra skydd, alltså att transienten fördröjs. Detta skulle även kunna åtgärdas genom att placera dioden och varistorn längre ifrån varandra på själva kretskortet i verkligheten eftersom vägen mellan kretsarna agerar som en induktans och desto längre väg mellan komponenterna ju högre induktans. Men om vi skulle vilja fördröja spänningen 100V som beskrivet med de nya komponenterna så skulle vi kunna räkna ut den behövda induktansen genom Ekvation 7. Med insättning av våra nya värden skulle vi då kunna räkna ut induktansen då vi önskar att den laddar upp 100V vid en strömförändring av 3.1A under 8 $\mu$ s. Vilket skulle se ut som följande:

$$L = 100V * \left( \frac{3.1A}{8\mu s} \right) = 258\mu H$$

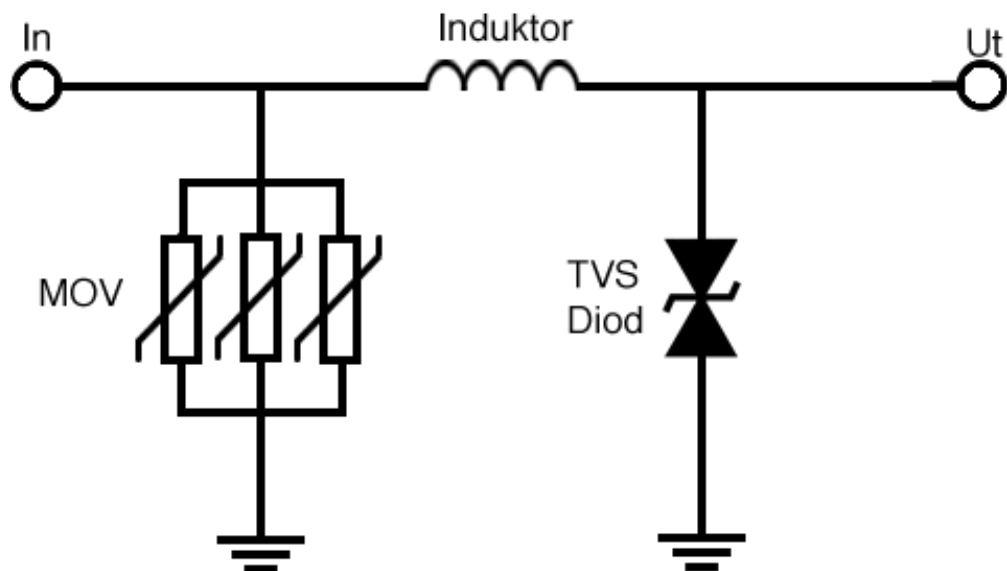
För att ta reda på den fulla påverkan som induktorn skulle ha på kretsen skulle vara att simulera det, detta för att verifiera inverkan av induktansen som läggs till. När det väl är framtaget så behöver även induktansen dimensioneras så att den klarar av den kontinuerliga ström som levereras från solcellerna. Eftersom induktorn

skulle ta plats på vägen mellan MOV och TVS dioden skulle den alltså hamna i serie med in- och utgång vilket skulle påverka utanliggande krets lite vid start och stopp, detta skulle även behövas testas i simulationer eller i verkligheten för att konstatera.

Man skulle även kunna ändra TVS dioden då den just nu vid 2.5A begränsar spänningen till 828V och inte 570V som vi tänkt [14]. TVS dioden 1.5KE440CA skulle isåfall fungera bättre eftersom den vid 3.1A begränsar ner spänningen till 602V. Även att TVS dioden inte har värden för högre strömmar så kan man på Figur 5 se att spänningsökningen är väldigt liten ju mer strömmen ökar. Denna TVS diod klarar av en kontinuerlig likströmsspänning på 376V vilket är över det i den utomstående kretsen. Det är hursomhelst inte trovärdigt att TVS dioden skulle överleva en smäll på 100A som varistorerna eftersom den endast är klassad för 1500W så för att vara säker att TVS dioden klarar av transienten som kommer efter induktorn behöver man även här parallellkoppla massa dioder eller så kan man kolla på en s.k. AK10 TVS diod vilket egentligen är en överklacifierad komponent till de strömmar vi testat emot men skulle garantera ett skydd mot alla LPL nivåer då AK10-380C vid 10.000A skulle begränsa ner spänningen till 520V [16]. Problemet med denna komponent är att den kostar över hundra gånger så mycket som den nuvarande dioden vi använder.

Med denna alternativa konfiguration skulle vi egentligen uppnå vad vi strävade efter till att börja med men inte riktigt uppnådde. Varistor skulle i detta fall vara ett första skydd eftersom den kan hantera högst energi och skulle därav kunna motstå den största delen av transienten. Induktorn skulle därefter fördröja transienten till TVS dioden så att TVS diodens bättre spänningsbegränsning skulle minska transientens spänning ner till under de 600V som ska skyddas emot. Denna nya konfiguration borde alltså även kunna skydda emot alla de LPL nivåerna i IEC 61000-4-5. Denna konfiguration skulle däremot vara mycket mer kostsam än vår nuvarande och vi har även inte kunnat testa denna eller kunnat lista ut riktigt vad

för induktans som skulle krävas för att möjliggöra detta. I Figur 23 kan vi se hur en alternativ krets skulle kunna se ut med de nya komponenterna.

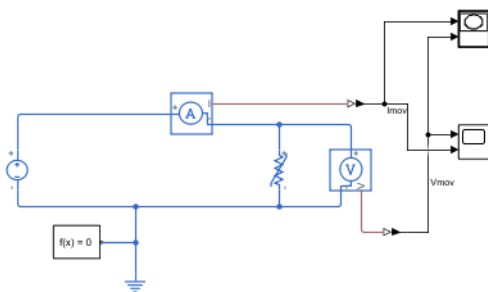


Figur 23. Alternativ design innehållande tre parallellkopplade metal oxide varistorer, en induktans och en parallellkopplad TVS diod.

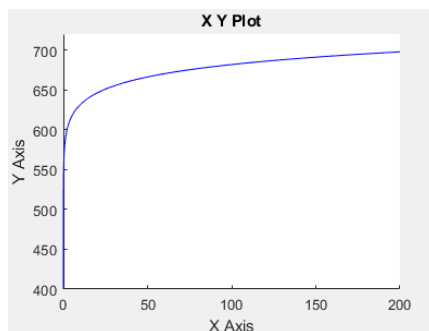
## 5.5.2 Simulering av alternativ krets

Eftersom induktorn i tidigare kapitel endast var spekulationer bestämde vi oss även för att simulera kretsen för att bättre förstå den inverkan som induktorn skulle ha om den lades till i kretsen samt även hur strömmen skulle fördela sig i kretsen.

Med hjälp av vår examinator tog vi fram ekvivalenta kretsar för de komponenter som vi använder i SIMULINK. I Figur 24 kan vi se den ekvivalenta kretsen för varistorn. I Figur 25 kan vi se tillhörande V-I kurva som gjordes i jämförande med databladet.

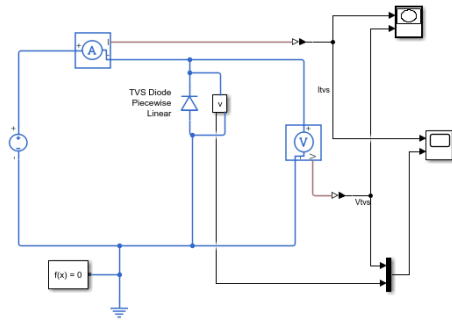


Figur 24. SIMULINK modell av varistor kopplat till en spänningskälla för att simulera dess beteende.

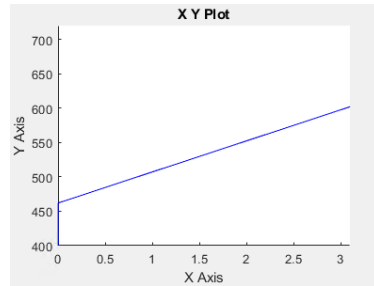


Figur 25. V-I kurva för den simulerade varistor modellen.

Tyvärr blev V-I kurvan inte helt ekvivalent med databladet eftersom vår simulerade modell endast begränsar spänningen till 680V i stället för 710V. Vi valde att fortsätta med denna modell ändå eftersom vi mest var ute efter att se beteendet och ungefärliga värden. En modell för TVS Dioden togs även fram som vi kan se i Figur 26, den tillhörande V-I kurva kan vi se i Figur 27, denna är mer ekvivalent till det som representeras i databladet eftersom TVS Dioden faktiskt begränsar ner spänningen vid 602V vid 3.1A.



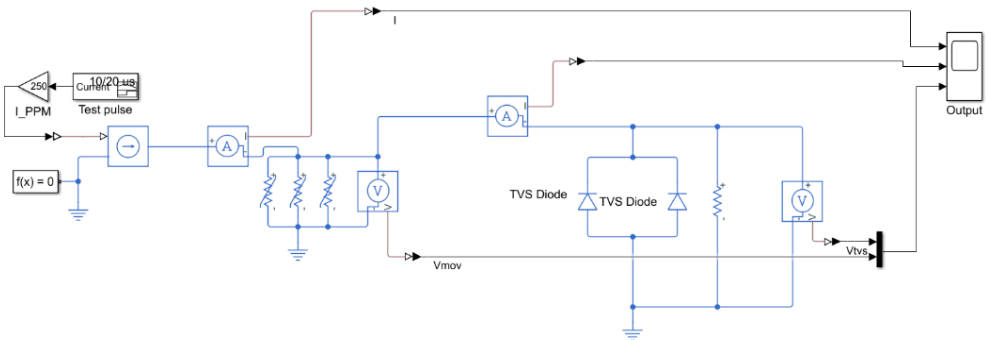
Figur 26. SIMULINK modell av TVS Diod kopplat till en spänningskälla för att simulera dess beteende.



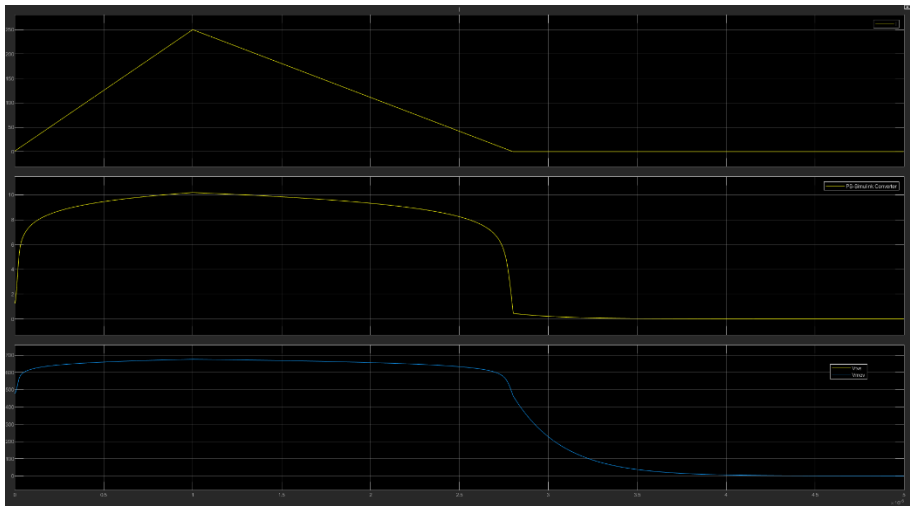
Figur 27. V-I kurva för den simulerade TVS diod modellen.

Följande i Figur 28 kan man även se hur de två modellerna kopplades ihop via SIMULINK och hur mätningarna skedde. Följande mätning gjordes och visas i Figur 29. I uppkopplingen ser vi att ingen induktor är medtagen, vi kom fram till att den planerade funktionen av induktorn blev ganska meningslös. Vid simulering kunde vi se att resistansen i TVS dioden blev högre än varistorerna då en strömpuls på 250A slog kretsen och därav kommer en mycket större andel ström gå in i varistorerna än dioden så dioden inte behöver ta en stor strömpuls utan det går till varistorerna. Därav kan vi designa om så att en induktor inte inkluderas och kretsen är då mer lik den första designen. Att parallellkoppla varistor och diod är fortfarande till vår fördel av de skäl vi tidigare beskrivit. I Figur 28 har vi även kopplat två TVS Dioder parallellt vilket vi gjorde ett test på. Utifrån det testet kan vi konstatera att det inte har en stor påverkan av hur mycket ström som går igenom den enskilda TVS dioden eftersom då två TVS dioder parallellkopplas dubblas strömmen som totalt går till de två TVS dioderna, alltså upplever de enskilt ungefär samma ström. Spänningen verkar anpassa sig utifrån varistorerna i kretsen vilket vi kunde se då vi testade med induktorn eftersom spänningen över TVS dioden sakta men säkert gick upp till den spänningsnivå som var över varistorerna. Vi kan även se ett bevis på det i plotten i Figur 29 då spänningen inte begränsas till 602V som den modellerade TVS dioden ska begränsa till utan högre vilket är ungefärligt den nivå som varistorerna begränsar till i den modellen vi använde, det förklarar ju även varför strömmen i TVS dioderna är högre än de 3.1A de egentligen ska nå. I Figur 29 kan vi slutligen se ungefärligt hur kretsen skulle hantera en 250A strömpuls som krävdes enligt den lägsta nivån i IEC 61000-4-5 [4]. Den spänning som ligger över kretsen vid pulsen är alltså ungefär 670V vilket är vad varistorerna var modellerade till, vilket visar på

att TVS dioderna har fått anpassa sig till den spänningen eftersom spänningen över TVS dioderna är samma som över varistorerna vilket inte syns så tydligt i plotten men den gula linjen (spänning över TVS dioder) ligger under den blåa (spänning över varistorerna) i den understa plotten. Eftersom spänningen över varistorerna blir just 670V vilket den ska bli då den enskilda varistorn känner av 100A bevisar det att den parallellkoppling vi använt oss utav fungerar för att fördela den 250A puls som kommer in till ungefär de 100A vi är ute efter (även att vår strömdelning gör att varje varistor känner av lägre än 100A). Eftersom TVS dioderna inte verkar begränsa ner spänningen till 602V som vi tänkt att de ska så när ju hursomhelst inte just denna krets heller den specifikationen vi är ute efter. Så eftersom varistorerna verkar vara den bestämmande faktor för spänningsbegränsningen så behövs parallellkopplade varistorer så att spänningen begränsas till blir 600V eller mindre, enligt databladet för varistorn skulle detta vara då strömmen som känns av är 1A [14]. TVS dioderna känns i detta fall ganska meningslösa men de kan vara bra att ha eftersom de kan finnas som en extra säkerhet om varistorerna skulle bli dåliga eller om en mycket snabbare puls kom in i systemet, vilket TVS dioderna skulle kunna behandla bättre på grund av deras snabbare responstid.



Figur 28. SIMULINK modell där tre av de modellerade varistorerna är parallellkopplade och två av de modellerade TVS dioderna är parallellkopplade. Kretsen får en strömpuls på 10/20us.



Figur 29. Resultat från testet i Figur 28 Översta plotten visar strömpulsen som skickades in i kretsen, mitten bilden visar den ström som går in i TVS dioderna och sista bilden visar spänningen över kretsen.

# Appendix A

## MATLAB KOD

```
%% Parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
sample_time = 2e-9;
time = sample_time*1e3; % s -> ms
vol_div = 4.390243902439; %Multiplificera upp den uppmätta spän-
ningen pga spänningsdelningen.
samples = B72220P3351K101{:,1}; % Same amount of sample for
each test.
samples_ms = samples*time;
% MOV values
clear MOV1_A;
clear MOV2_A;
clear MOV1_V;
clear MOV2_V;
MOV1_A = B72220P3351K101{:,2};
MOV2_A = MOVny{:,2};
MOV1_V = B72220P3351K101{:,3}*vol_div;
MOV2_V = MOVny{:,3}*vol_div;

%TVS DIODE values
clear TVS_A;
clear TVS_V;
TVS_A = TVSnyny{:,2};
TVS_V = TVSnyny{:,3}*vol_div;

%Parallell values
clear parallell1_A;
clear parallell2_A;
clear parallell1_V;
clear parallell2_V;
parallell1_A = TVSDIOD15KE600CAoB72220P3351K101{:,2};
parallell2_A = parallell3forsok{:,2};
parallell1_V = TVSDIOD15KE600CAoB72220P3351K101{:,3}*vol_div;
parallell2_V = parallell3forsok{:,3}*vol_div;

%% MOV 12kA 560V (typ)
```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1);

subplot(4,1,2);
plot(samples_ms,MOV1_V)
xlim([2.5 6])
hold on
plot(samples_ms,MOV2_V)
xlim([2.5 6])
title('Spänningskurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Spänning [V]');
grid
xlim([2.5 6])
hold off

subplot(4,1,3);
MOV_P = (MOV1_A.*MOV1_V);
plot(samples_ms, MOV_P)
xlim([2.5 6])
title('Effektkurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Effekt [W]');
grid

subplot(4,1,4);
clear cumsum_MOV_P
clear MOV_W
cumsum_MOV_P = cumsum(MOV_P);
MOV_W = cumsum_MOV_P*sample_time; % W = P*dt
plot(samples_ms, MOV_W)
xlim([2.5 6])
hold on
MOV_calc_W = 0.5*60e-6*(720^2.-MOV1_V.^2);
plot(samples_ms, MOV_calc_W)
xlim([2.5 6])
title('Energikurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Energi [J]');
legend('Uppmätta värden', 'Uträknade värden');
grid
hold off

subplot(4,1,1);
plot(samples_ms,MOV1_A)

```

```

xlim([2.5 6])
hold on
plot(samples_ms,MOV2_A);
xlim([2.5 6])
title('MOV 12kA 560V Strömkurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Ström [A]');
legend('MOV1', 'MOV2');
grid
hold off

%% TVS DIOD 570V breakdown
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(2);

figure(2);
subplot (4,1,2);
plot(samples_ms,TVS_V);
xlim([2.5 6])
title('Spänningskurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Spänning [A]');
grid

subplot(4,1,3);
TVS_P = (TVS_A.*TVS_V);
plot(samples_ms, TVS_P)
xlim([2.5 6])
title('Effektkurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Effekt [W]');
grid

subplot(4,1,4);
clear cumsum_TVS_P
clear TVS_W
TVS_W = cumsum(TVS_P)*sample_time;
plot(samples_ms, TVS_W)
xlim([2.5 6])
hold on
TVS_calc_W = 0.5*60e-6*(720^2-TVS_V.^2);
plot(samples_ms, TVS_calc_W)
xlim([2.5 6])
title('Energikurva');

```

```

xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Energi [J]');
legend('Uppmätta värden', 'Uträknade värden');
grid
hold off

subplot (4,1,1);
plot(samples_ms,TVS_A)
xlim([2.5 6])
title('TVS DIOD 570V breakdown Strömkurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Ström [A]');
grid

%% MOV AND TVSDIODE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(5);

subplot(4,1,2);
plot(samples_ms,parallell1_V)
xlim([2.5 6])
hold on
plot(samples_ms,parallell2_V)
xlim([2.5 6])
title('Spänningskurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Spänning [V]');
grid
hold off

subplot(4,1,3);
parallell_P = (parallell2_A.*parallell2_V);
plot(samples_ms, parallell_P)
xlim([2.5 6])
title('Effektkurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Effekt [W]');

subplot(4,1,4);
%clear cumsum_MOV_parallell_P
%clear parallell_W
parallell_W = cumsum(parallell_P)*sample_time;
plot(samples_ms, parallell_W)
xlim([2.5 6])

```

```

hold on
parallell_calc_W = 0.5*60e-6*(720^2.-parallell2_V.^2);
plot(samples_ms, parallell_calc_W)
xlim([2.5 6])
title('Energikurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Energi [J]');
legend('Uppmätta värden', 'Uträknade värden');
hold off

subplot (4,1,1);
plot(samples_ms,parallell1_A)
xlim([2.5 6])
% calc_parallell_A = parallell2_A - (0.5*60e-3*(720^2-paral-
lell2_V.^2)./parallell2_V);
hold on
plot(samples_ms,parallell2_A)
%plot(samples_ms,calc_parallell_A)
title('MOV och TVS dioden parallellt - Strömkurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Ström [A]');
legend('Uppmätt ström 1','Uppmätt ström 2');
grid
hold off

%% Compare PARALLELL with solo TVS DIODE AND MOV
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(6);

subplot (1,1,1);
plot(samples_ms,parallell2_A)
xlim([2.5 6])
hold on
plot(samples_ms,MOV1_A)
xlim([2.5 6])
plot(samples_ms,TVS_A)
xlim([2.5 3.5])
title('Allt - Strömkurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Ström [A]');
legend('Parallell', 'B72220P3351K101', '1.KE600CA');
grid
hold off

subplot(4,1,2);
plot(samples_ms,parallell2_V)

```

```

xlim([2.5 6])
hold on
plot(samples_ms,MOV1_V)
xlim([2.5 6])
plot(samples_ms,TVS_V)
xlim([2.5 6])
title('Allt - Spänningskurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Spänning [V]');
grid
hold off

subplot(4,1,3);
plot(samples_ms,parallell_P)
xlim([2.5 6])
hold on
plot(samples_ms,MOV_P)
xlim([2.5 6])
plot(samples_ms,TVS_P)
xlim([2.5 6])
title('Allt - Effektkurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Effekt [W]');
grid
hold off

subplot(4,1,4);
plot(samples_ms,parallell_calc_W)
xlim([2.5 6])
hold on
plot(samples_ms,MOV_calc_W)
xlim([2.5 6])
plot(samples_ms,TVS_calc_W)
xlim([2.5 6])
title('Allt - Energikurva');
xlabel('Tid [ms]');
ylabel('Energi [J]');
grid
hold off

```

## Bibliografi

- [1] Solar Bora, (2020). *Power to enable growth and empowerment*, [online] solar-bora.com. Available at <https://www.solarbora.com/?lang=sy> [Accessed 10 Feb. 2021].
- [2] SMHI, (2013). *Blixtar*, [online] smhi.se. Available at <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/blixtar-1.662> [Accessed 10 Feb. 2021].
- [3] N. Kularatna, A. Steyn Ross, J. Fernando and S. James. *Design of Transient Protection Systems*. Elsevier Science, 2019. doi: 10.1016/C2016-0-00423-0
- [4] SEK Svensk Elstandard, "Åskskydd - Del 4: Skydd av elektriska och elektroniska system i byggnader", SVENSK STANDARD SS\_EN\_620305\_4, 5 October 2011.
- [5] J. Dwyer, M. Uman, "The physics of lightning", *Physics Reports*, vol. 534, no. 4, p. 147-241, January 2014. doi: 10.1016/j.physrep.2013.09.00
- [6] C. Baum, FELLOW and IEEE, "From the Electromagnetic Pulse to High-Power Electromagnetics", *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, issue. 6, p. 789-817, June 1992. doi: 10.1109/5.149443 [Accessed June 2021]
- [7] T. Kisielewicz, C. Mazzetti, G.B.L. Piparo, B. Kuca, and Z. Flisowski, "Electronic apparatus protection against LEMP: Surge threat for the SPD selection", In Proc. 2012 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2012. doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396749
- [8] G. Maslowski and M. Gamracki, "Protection of structures against LEMP", In Proc. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003. doi: 10.1109/PTC.2003.1304141
- [9] D. Wang, Y. Li, P. Dehghanian, and S. Wang, "Power Grid Resilience to Electromagnetic Pulse (EMP) Disturbances: A Literature Review", In Proc. 2019 North American Power Symposium (NAPS), 2019. doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000227
- [10] G. Xuanhui, R. Huashan, Q. Yu, and X. Zhuqin, "Design and Application of PCB-mounted SPDs for PV Inverters", 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), 2019. doi: 10.1109/APL.2019.8815975

- [11] R. Chundru, Z. Li, D. Pommerenke, K. Kam, C.W. Lam, F. Centola, and R. Steinfeld, " An evaluation of TVS devices for ESD protection", 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2011. doi: 10.1109/ISEMC.2011.6038285
- [12] TDK Electronics, "SIOV metal oxide varistors", B772\* datasheet, Jan. 2018.
- [13] Littelfuse, *Transient Suppression Devices and Principles*, Littelfuse, Inc. 1998.
- [14] Littelfuse, "1.5KE Series", TVS Diodes datasheet, 2020 [Revised Oct. 2020]
- [15] M.S. Mamis, C. Keles, M. Arkan, and R. Kaya, "Lightning surge analysis of Faraday cage using alternative transient program-electromagnetic transients program", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol.10, issue. 4, p.1016-1022, March, 2016. Available: doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0794 [Accessed June 2021]
- [16] Littelfuse, "AK10 Series" TVS Diodes datasheet, 2020 [Revised Oct. 2020]