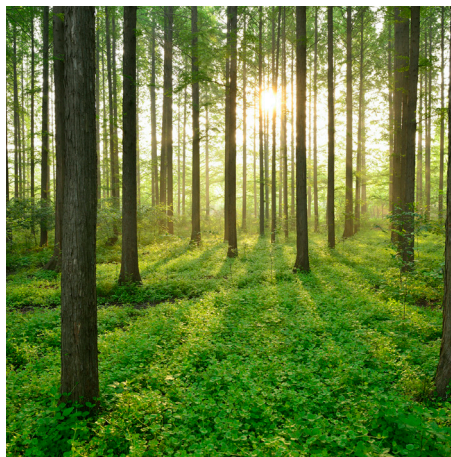


BERÄKNING AV HÄNDELSEENERGIER FÖR ELNÄTSANLÄGGNINGAR

TERMISK LJUSBÅGSENERGI

RAPPORT 2025:1098



UNDERHÅLL AV ELNÄT



Beräkning av händelseenergier för elnätsanläggningar

Termisk ljusbågsenergi

KLAS-GÖRAN SUNDVALL

ISBN 978-91-89919-98-3 | © Energiforsk mars 2025

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Projektet *Beräkning av händelseenergies för elnätsanläggningar* ingår i programmet *Underhåll för elnät* har initierat. Vid arbete i elnätsanläggningar där val av arbetsmetod AMS (arbete med spänning) eller ANS (arbete nära spänning) behövs, ska det göras en uppskattning om händelseenergies i den aktuella anläggningen. Projektet har utrett två olika system att beräkna händelseenergies vid ljusbåge i elanläggning.

Rapporten presenterar en förenklad beräkningsmetod för att uppskatta händelseenergie och ge rekommendationer kring personlig skyddsutrustning associerad med ljusbågsrisker. Projektet har genomförts av Klas-Göran Sundvall.

Stort tack till programstyrelsen för deras engagemang i projektet:

- | | |
|---|---|
| • Mohammed Abudaher, Mölndal Energi Nät | • Jan Olof Jonsson, Jämtkraft Elnät (vice ordf) |
| • Homan Aldén, Energiföretagen Sv. (adj) | • Hans Lagergren, Svenska kraftnät |
| • Fredrik Andersson, Elinorr Ek. förening | • Johan Lindblad, Hitachi Energy Sweden |
| • Joakim Andersson, Ystad Energi | • Tommie Lindquist, RISE |
| • David Berg, Falu Elnät | • Johan Ribrant, Nacka Energi (ordförande) |
| • Jon Danielsson, Skellefteå Kraft Elnät | • Eva Slätis, Norrtälje Energi |
| • Johan Gustafsson, Göteborg Energi Nät | • Magnus Sjunnesson, Öresundskraft |
| • David Håkansson, Borås Elnät | • Anders Sjökvist, Falkenberg Energi |
| • Julius Lundqvist, Jönköping Energi Nät | • Kenneth Stefansson, Vattenfall Eldistribution |
| • Salomon Roos, E.ON Energidistribution | • Anton Svensson, Ellevio |

Tack även till referensgruppen som stöttat projektet och bidragit med erfarenheter; Jimmy Laukas från Vattenfall, Ulf Melin på E.ON, Reijo Eriksson på Ellevio, Mats Ählberg från Sveriges Elkraftentreprenörer och Mathias Hällerrå från Omexom.

Energiforsk framför ett stort tack till samtliga för värdefulla insatser till följande bolag har deltagit som intressenter till projektet:

- | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| • E.ON Energidistribution | • Luleå Energi | • Hamra Besparingsskog |
| • Vattenfall Eldistribution | • Falu Energi & Vatten | • Hofors Elverk |
| • Ellevio | • PiteEnergi Elnät | • Härjeåns Nät |
| • Svenska kraftnät | • Norrtälje Energi | • Härnösand Elnät |
| • Göteborg Energi Nät | • Eskilstuna Elnät | • Ljusdal Elnät |
| • Öresundskraft | • Mölndal Energi Nät | • Malungs Elnät |
| • Tekniska verken i Linköping | • Falkenberg Energi | • Sandviken Energi Nät |
| • Skellefteå Kraft Elnät | • Ystad Energi | • Sundsvall Elnät |
| • Jämtkraft Elnät | • Elinorr ekonomisk förening; | • Söderhamn Elnät |
| • Umeå Energi Elnät | • Bergs Tingslags Elektriska | • Åsele Elnät |
| • Jönköping Energi Nät | • Blåsjön Nät | • Årsunda Kraft & Belys.fören. |
| • Hitachi Energy Sweden | • Dala Energi Elnät | • Övik Energi Nät och |
| • Bodens Energi Nät | • Elektra Nät | • Energiföretagen |
| • Borås Energi Nät | • Gävle Energi | |

Stockholm i mars 2025

Susanne Stjernfeldt

Energiforsk AB

Forskningsområde Elnät, Vindkraft och Solel

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Det finns två sätt att testa skyddsutrustning för den termiska ljusbågsenergin som kan uppstå vid en ljusbåge. Dessa standarder anger inte hur beräkningen av den energi som uppstår vid en ljusbåge i en anläggning vid ett visst avstånd ska beräknas. Det finns idag två etablerade sätt att utföra dessa beräkningar. I denna rapport beskrivs översiktligt hur testerna utförs och hur man ska genomföra de två beräkningsmodellerna. I slutet har valts att göra beräkningarna enligt IEEE 1584¹ i tabellform för några vanliga fall.

Vid en genomgång av de två beräkningsmodellerna är det mycket tydligt att skillnaderna är stora i hur man genomför beräkningarna. Den viktigaste skillnaden är strävan efter exakthet. I IEEE 1584 försöker man att beräkna ljusbågsenergin så exakt som möjligt, medan i DUGV 203-077² är strävan mera att kunna visa att energin är lägre än det som min skyddsutrustning klarar av. Detta innebär att beräkningarna enligt IEEE 1584 blir klart mera komplicerade och man måste veta mera om den elektriska anläggningen och hur arbetet ska utföras innan beräkningen genomförs. Det är mycket svårt att genomföra beräkningen utan något hjälpmedel (ett flertal program finns att köpa). Om man genomför beräkningen enligt DUGV 203-077 så är den klart enklare och gratis Excelprogram finns att hämta hos DUGV. En viktig skillnad efter att dessa kalkyler genomförts är att i IEEE 1584 finns inget beslutsunderlag för vilken PPE som ska väljas, däremot syftar beräkningen i DUGV 203-077 till att ge ett sådant underlag (även en riskbedömning ska genomföras). På senare tid har dessa modeller närmast sig varandra då det har blivit mera vanligt att man tillsammans med IEEE 1584 väljer att följa valda delar ur NFPA 70E³. Om man väljer att följa den kategoriindelning som finns där så blir skillnaden mellan metoderna mindre.

Det finns idag ett flertal beräkningar utförda som man kan hitta på nätet men de flesta är tänkta för en industri där skydden består av en effektbrytare. I dessa fall kan man se att ljusbågsenergin blir större om ljusbågsströmmen ökas då fränkopplingstiden är i stort sett konstant om strömmen är relativt stor i förhållande till brytaren märkström. När det gäller smältsäkringar så blir energierna lägre eller konstant om ljusbågsströmmen ökas och är stor i förhållande till säkringens storlek (>15–20 ggr säkringen nominella strömvärde, beroende på typ av säkring). Detta innebär en helt annan riskbedömning än den som krävs vid en effektbrytare. Det är när det är långa fränkopplingstider vid en ljusbåge som problem kan uppstå, särskilt vid tider på sekunder. I dessa fall bör arbetsmetoderna med eller nära spänning undvikas. Om detta inte kan undvikas bör en noggrann riskbedömning utföras som t.ex. kan innebära byte av säkring eller användning av personlig skyddsutrustning. Man kan även se att om kortslutningsströmmen är över 20 kA och säkringen är på 200 A eller lägre så blir

¹ IEEE 1584-2018, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations

² DUGV 203-077, Thermal hazards due to electric fault arcing, Guide for the selecting personal protective equipment

³ NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace (www.nfpa.org)

ljusbågsenergierna hanterbara. Tanken är att för de vanligaste anläggningarna kan man studera en tabell och välja lämplig PPE efter en riskbedömning. För andra anläggningar krävs en beräkning från fall till fall.

Nyckelord

Ljusbåge, ljusbågsenergi, PPE, ELIM, APTV, händelseenergi

Summary

There are currently two ways to test protective equipment for the thermal arc energy that can occur in the event of an arc. These standards do not specify how the calculation of the energy arising from an arc in a facility at a certain distance should be calculated. There are currently two established ways of performing these calculations. This report describes how the tests are performed and how to implement the two calculation models. At the end, it has been chosen to make the calculations according to IEEE 1584 in tabular form for some common cases.

When reviewing the two calculation models, it is very clear that the differences are large in how the calculations are carried out. The most important difference is the pursuit of accuracy. In IEEE 1584, one tries to calculate the arc energy as precisely as possible, while in DUGV 203-077 the effort is more to be able to show that the energy is lower than what my protective equipment can handle. This means that the calculations according to IEEE 1584 become clearly more complicated and one must know more about the electrical installation and how the work is to be carried out before the calculation is carried out. It is very difficult to carry out the calculation without some aid (several programs are available for purchase). If you carry out the calculation according to DUGV 203-077, it is clearly simpler and free Excel programs can be downloaded from DUGV. An important difference after these calculations have been carried out is that in IEEE 1584 there is no decision basis for which PPE to choose, whereas the calculation in DUGV 203-077 aims to provide such a basis (a risk assessment must also be carried out). Recently, these models have come closer to each other as it has become more common to choose to follow selected parts of NFPA 70E together with IEEE 1584. If you choose to follow the categorization found there, the difference between the methods becomes smaller.

Today, there are several calculations carried out that can be found online, but most of them are intended for an industry where the protection consists of a circuit breaker. In these cases, it can be seen that the arc energy becomes greater if the arc current is increased, as the disconnection time is largely constant if the current is relatively large in relation to the rated current of the breaker. In the case of fuses, the energies become lower or constant if the arc current is increased and is large in relation to the size of the fuse (>15-20 times the fuse's nominal current value, depending on the type of fuse). This means a completely different risk assessment than that required for a circuit breaker. This means that it is when there are long disconnection times at a short circuit that problems can arise, especially at times of seconds. In these cases, working methods with or near voltage should be avoided. If this cannot be avoided, a careful risk assessment should be carried out, e.g. may involve replacing fuses or using personal protective equipment. You can also see that if the short-circuit current is above 20 kA and the fuse is 200 A or lower, the arc energies become manageable. The idea is that for the most common facilities, you can study the table and choose the appropriate PPE after a risk assessment. For other facilities, a case-by-case calculation is required.

Innehåll

1	Vad är en ljusbåge och var kan man läsa mera om den	11
2	Standarder för hur skydden skall provas och märkas	12
2.1	SS-EN 61482-2, utg 1:2020, Kläder för skydd mot termiska risker orsakade av ljusbågar - Del 2: Fordringar (IEC 61482-2)	12
2.2	SS-EN IEC 62819, utg 1:2023 Ögon-, ansikts-, och huvudskydd mot risker orsakade av ljusbågar – Funktionsfordringar och testmetoder.	13
2.3	Handskar	14
2.4	Skor	14
3	Jämförelse mellan testmetoder	15
4	Grundläggande regler för NFPA 70E	18
5	IEEE 1584, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations	24
5.1	Ett exempel på hur beräkningen kan se ut	25
5.2	Ett mera konkret exempel på landsbyggsnät	28
6	DUGV 203-077 Thermal hazards due to electric fault arcing	31
6.1	Ett exempel på hur beräkningen kan se ut	36
6.2	Ett mera konkret exempel på landsbyggsnät	37
7	Erfarenhetsmässiga jämförelser mellan ATPV och box test	39
8	Exempel på beräkningar	40
8.1	Exempel på beräkningar enligt DUGV 203-077	40
8.2	Följande exempel är beräknade enligt IEEE 1584	41
9	Andra beräkningsmodeller	47
10	Definitioner	48
11	Referenslista	49

1 Vad är en ljusbåge och var kan man läsa mera om den

En kontinuerlig elektrisk urladdning genom luft kallas ljusbåge, där den elektriska spänningen joniserat luften (plasma bildas) varvid luften blivit elektriskt ledande. Strömmen hettar upp luften till flera tusen grader, varvid den avger ljus och ljud. Ljusbågar inträffar naturligt vid blixtar, men kan även utnyttjas vid t.ex. svetsning och ljusbågsugnar. En ljusbåge är en kontinuerlig urladdning, medan en elektrisk gnista är kortvarig. En ljusbåge har ett icke-linjärt förhållande mellan ström och spänning. Ljusbågen uppstår i det gasfyllda utrymmet mellan två ledande föremål och resulterar i mycket höga temperaturer som kan smälta eller förångas de flesta material.

Riskerna när en ljusbåge uppstår skiljer sig om det är växelström eller likström, vid växelström är ström och spänning noll två gånger per period och detta ökar sannolikheten att ljusbågen slocknar, särskilt om ljusbågen förlängs.

Beskrivning av ljusbåge enligt ChatGPT

En ljusbåge är en kraftig elektrisk urladdning som sker mellan två ledare genom en gas eller luft. Det uppstår när ett elektriskt fält är tillräckligt starkt för att jonisera gasen, vilket skapar en ledande kanal där elektroner kan strömma fritt. Detta resulterar i en intensiv ljusemission och en mycket hög temperatur, ofta flera tusen grader Celsius.

Ljusbågar kan uppstå naturligt, som vid blixtnedslag, eller i kontrollerade miljöer som vid svetsning, där de används för att smälta metall. De kan också vara farliga om de uppstår oavsiktligt, till exempel i elektriska apparater, eftersom de kan orsaka brand eller skador på utrustning.

För den som vill fördjupa sig i hur man beräknar den termiska ljusbågsenergin och bakgrunderna till denna text är det bra (och ibland nödvändigt) att ha tillgång till följande texter :

NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace (www.nfpa.org)

IEEE 1584-2018, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations

DUGV 203-077, Thermal hazards due to electric fault arcing, Guide for the selecting personal protective equipment

2 Standarder för hur skydden skall provas och märkas

2.1 SS-EN 61482-2, UTG 1:2020, KLÄDER FÖR SKYDD MOT TERMISKA RISKER ORSAKADE AV LJUSBÅGAR - DEL 2: FORDRINGAR (IEC 61482-2)



EN 61482-2:2020
ELIM: 8,1 cal/cm²
EBT: 8,7 cal/cm²
APC 1

Det kan vara olika skydd på framsidan och baksidan av kläder, detta skall i så fall framgå tydligt med en figur eller liknande. Om skyddet består av byxor och överdel skall skyddet bestå om armarna räcks upp och man böjer sig fram så att fingertopparna når marken.

Skyddskläder ska levereras till kunden med information på landets officiella språk med minst följande:

- Namn och fullständig adress till tillverkaren och/eller auktoriserad representant.
- Produktbeteckning.
- numret på standarden (IEC 61482–2) med publiceringsår (fyra siffror);
- piktogram, information och förklaring om typen av ljusbågstest (ljusbågens energi eller/och ljusbågsskyddsklass);
- Information om storlek.
- information till användaren som:
 - miljöförhållandena och riskerna på arbetsplatsen ska beaktas;
 - avvikelser från parametrarna i detta dokument kan leda till försämrat skydd
 - Skyddskläder ska bäras stängda
 - skyddskläder enligt detta dokument är inte avsedda att användas som elektriska isolerande skyddskläder och ger inte skydd mot strömgenomgång;
 - skyddskläder som blir förorenade med fett, olja eller brandfarliga vätskor eller brännbara material bör inte användas;
 - Skyddskläder bör rengöras vid behov;
 - skyddskläder som är skadade i den utsträckning att dess skyddande egenskaper är nedsatt (t.ex. hål i plagget, ej fungerande stängningar) ska inte användas;
- information till användaren
 - om skyddsnivån för alla plagg och för plaggsystemet
 - om plagget är tillverkat av olika material (t.ex. för fram och bak), ska detta framgå med hjälp av en ritning av plagget inklusive mått och varningsindikering
 - att för helkroppsskydd lämplig extra skyddsutrustning (hjälm med skyddande visir, skyddshandskar och skor (stövlar)) ska användas.
 - att andra plagg som bärs tillsammans med skyddskläder samt smutsiga skyddskläder kan minska skyddet
 - att skadade plagg ska repareras eller bytas ut. I händelse av trasiga kläder, t.ex. skadade kläder bör inte repareras, reparation är endast tillåten i enlighet med

tillverkarens instruktioner

- att inga plagg som skjortor eller underkläder gjorda av t.ex. polyamid-, polyester- eller akrylfibrer som smälter under ljusbågsexponering bör användas
- Skötselanvisningar i enlighet med ISO 3758 och/eller ISO 30023;
- reparationsinstruktioner (t.ex. varningar: reparationer får inte försämra klädernas prestanda; reparation endast med identiskt material och av lämpligt kvalificerade företag; reparera inte själv);
- förvaringsinstruktioner (t.ex. förvara torrt och dammfritt; ingen lagring under intensiv ljusexponering)

2.2 SS-EN IEC 62819, UTG 1:2023 ÖGON-, ANSIKTS-, OCH HUVUDSKYDD MOT RISKER ORSAKADE AV LJUSBÅGAR – FUNKTIONSFORDRNINGAR OCH TESTMETODER.

Här saknas en del översättningar av termer t.ex. Hood = Huva?, Visor= något som skyddar ögonen och ibland området runt ögonen, detta kan vara hela ansiktet. Observera att hela det område som täcks behöver inte vara hela det område som skyddas.

Standarden beskriver en del runt linser som blir mörka när de utsätts för ljus (tänk skydd när man svetsar), dessa kan täcka bara ögonen eller hela ansiktet, och blir i det senare fallet en väsentlig del i skyddet av den värme som strålar från ljusbågen. Det bör observeras att färgseendet försämras och att man bör kontrollera om man ser de färger och signallampor som krävs för det arbete som ska utföras.

Det finns skydd för olika delar av ansiktet, från ögonen till hela huvudet och hals, nacke.

Ögonskydd skall klara en tryckvåg på minst 45 m/s och för skydd över 8 cal/cm² eller APC 2⁴ skall klara en tryckvåg på 80 m/s.

Ljusbågsskyddet kan bestå av ett ansiktsskydd som monteras framför ansiktet på en hjälm eller fästs med remmar eller glasögon tillsammans med en balaklava eller öppen huva med eller utan hjälm, eller en sluten huva med eller utan inbyggd hjälm eller så kan huvan träs över hjälmen på huvudet. Skyddet skall vara minst ett skydd mot en ljusbåge mitt emot ansiktet, men kan även bestå av skydd mot ljusbågar på sidorna eller/och bakifrån.

Testningen är relativt lika som för kläder några avvikelser finns, t.ex. kan man testa om skyddet överstiger 100 cal/cm², men man märker inte högre än 100 cal/cm².

Måtten på huvudet skall uppfylla kraven för ett manligt huvud.

⁴ Det finns idag två nivåer av skydd i DUGV203-077, APC 1 (168 kJ) och APC 2 (320 kJ), dessa gäller då för den konfiguration som är vid skyddets testning

2.3 HANDSKAR

Det finns idag ingen internationell standard för hur handskar ska testas, de som finns på marknaden testas idag enligt någon nationell standard. Det pågår ett arbete inom IEC för att ta fram en standard enligt samma modell som för kläder. Kommer att få följande beteckningar:

IEC 63232-1-1, Många kommentarer på förslaget, kommer att skrivas om en hel del. I grunden så är förslaget att testa som kläder.

IEC 63232-1-2. Testen föreslås vara ungefär som för kläder, en viktig skillnad är att man genomför testen på två avstånd 300 mm som tidigare men även på 150 mm, då man anser att det är troligt att händerna är närmare ljusbågen än ansikte och kläder (bål). APC 1 och APC 2 samt APC 1/150 och APC 2/150

2.4 SKOR

Det finns idag ingen internationell standard för hur skor ska testas, de som finns på marknaden testas idag enligt någon nationell standard. Det pågår ett arbete inom IEC för att ta fram en standard enligt samma modell som för kläder.

3 Jämförelse mellan testmetoder

Jämförelse mellan de två testmetoderna, Bestämning av termiska egenskaper (ELIM, ATPV och/eller EBT) hos tyg och skyddskläder genom provning med öppen ljusbåge, Open arc (IEC 614 82-1-1) och Bestämning av skyddsklass för tyg och klädesplagg genom provning med riktad ljusbåge, Box test (IEC 614 82-1-2).

För förklaring av ELIM, ATPV, EBT och APC, se text efter tabellen.

	Open arc, IEC 614 82-1-1	Box test IEC 614 82-1-1
Testar tyg och kläder	Ja (kallas A respektive B)	Ja
Tyg	Bestämmer ATPV eller EBT, samt ELIM om beställaren vill ha det. (ELIM vanligast i Europa)	Bestämmer Class 1 (168 kJ $\pm$ 17 kJ) eller Class 2 (320 kJ $\pm$ 22 kJ)
Kläder skall passa dockan	Ja	Ja
Kläder ska tvättas innan testning.	5 ggr om inget annat anges. Om plagget kan tvättas maskin och kem så väljs maskin	5 ggr om inget annat anges. Om plagget kan tvättas maskin och kem så väljs maskin
Luftgap vid test	300 mm $\pm$ 5 mm	30 mm $\pm$ 1 mm
Avstånd mellan ljusbågens centrallinje och tyg eller docka	300 mm $\pm$ 5 mm	300 mm $\pm$ 5 mm
Antal test för tyg	ATPV: minst 20 mätpunkter. EBT: Tills grundkraven för märkning uppfyllts. 3 över 3 under och 10 med mindre än 20% i avvikelse. ELIM: Kan oftast använda tester från ATPV eller EBT, om EBT är lägre än ATPV	Fyra, om en (1) av dessa inte uppfyller kraven ska ett femte prov genomföras
Antal test för kläder	Minst ett	Minst ett
Boxens storlek	-	Öppning 125 mm, djup 115 mm
Styrning av ljusbåge	Ljusbågen hålls på plats med hjälp av magnetfältet från ljusbågsströmmen	-

Minimivärde	ELIM 130 kJ/m ² (3,2 cal/cm ²) ATPV och/eller EBT är minst 167 kJ/m ² (4 cal/cm ²)	APC 1 (Class 1) Under 50 kJ vid beräkning krävs inget skydd
Testvärden		APC 1 (Class 1) , 168 kJ APC 2 (Class 2), 320 kJ Utanför standarden används även högre värden 410 kJ och 630 kJ
Vid beräkning av PPE	Beräkningsmetoden är framtagen genom praktiska prov och har ingen anpassning till testningen av tyger	Teoretiskt framtagen för att passa till testningen av tyger till den personliga skyddsutrustningen
Strömmar	Tar fram den ljusbågsström som är minimum för att få maximal tid på skyddet	Max och min kortslutningsström ska tas fram
Enfasig eller trefasig ljusbågsström	Trefasig ljusbågsström baserad på 5 olika konfigurationer som ska stämma överens med hur den beräknade anläggningen ser ut.	Ljusbågsströmmen beräknas som en enfasström från en källa som inte antas vara den riktiga strömkällan
R/X	Kan vara okänt	Bör anges
Skåpets konstruktion	Korrelationsfaktor beroende på skåpets höjd bredd och djup, samt hur skenstråket är uppbyggt	Korrektionsfaktor för skåpets storlek, men inte så exakta
Arbetsplats	Beräknar termisk ljusbågsenergi för en viss plats	Beräknar ljusbågsenergin vid ett avstånd på 300 mm. Kan korrigeras beroende på det faktiska avståndet
Val av olika termiska ljusbågsenergier	Ingen begränsning. I testningen finns en begränsning: lägsta nivå på 3,2 cal/cm ² (ELIM) och en högsta nivå av 100 cal/cm ²	Val av PPE är begränsad till APC 1 och APC 2
Underlag för var arbetet kan utföras	Ger en gräns för hur nära ett arbete kan utföras	Ger ingen exakt gräns för hur nära man kan arbeta
Maximal fränkopplingstid vid beräkning	Anger 2 sekunder som maximal tid	Anger 1 sekund som maximal tid

Ger PPE?	Är framtagen för att ge underlag till en riskbedömning, ger inga rekommendationer om val av PPE	Är framtagen för att välja PPE
Spänningsområde	Är tänkt att användas från 208 V till 15kV, men används mest vid lågspänning	Är tänkt att användas mellan 50V och 110 kV, men används mest vid lågspänning.

Tabell 1 Jämförelse mellan testmetoder

ATPV: Termiskt prestandavärde mot ljusbåge (arc thermal performance value). Numeriskt värde av infallande energi som tillskrivs en produkt som beskriver dess termiska egenskaper att dämpa (reducera) ett värmefflöde som genereras av en elektrisk ljusbåge.

EBT: Tröskelenergi för öppet genombrott, (breakopen threshold energy). Numeriskt värde för infallande energi som tillskrivs produkten (material eller kläder) som beskriver dess genombrottsegenskaper när de utsätts för värmeenergi som genereras av en elektrisk ljusbåge.

ELIM: Gränsvärde för termisk ljusbågsenergi (incident energy limit) numeriskt värde för infallande energi som tillskrivs en produkt (material eller kläder), under vilket värde alla produktsvar ligger under Stoll-kurvan och utan genombrott. ELIM för ett klädesplagg eller en uppsättning klädesplagg är alltid mindre än eller lika med ELIM för tyget. ,

APC: Ljusbågsskyddsklass (arc protection class). Kategori för skydd mot ljusbågens värme för ett material och/eller produkt som testats i enlighet med boxtestet (APC 1 eller APC 2) (Class1 eller Class 2)

PPE: Personlig skyddsutrustning (Personal Protective Equipment)

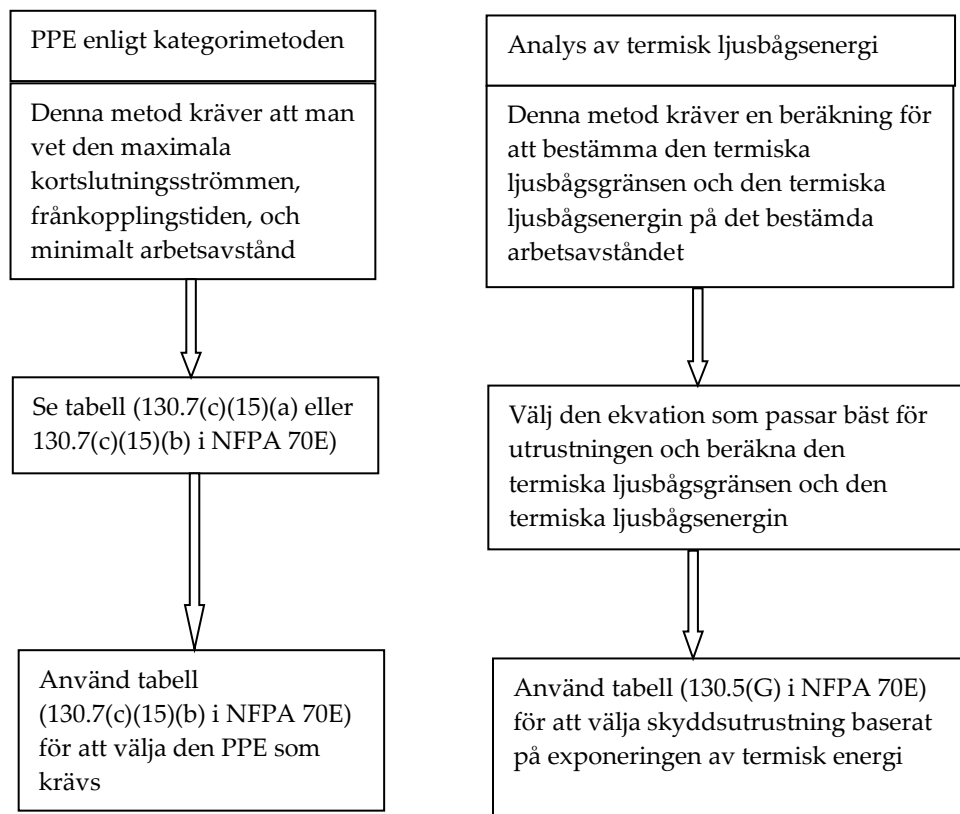
4 Grundläggande regler för NFPA 70E

NFPA 70E är ett dokument som ges ut av National Fire Protection Association i USA. Dokumentet omfattar elsäkerhetskrav för anställda. Där finns bland annat texter som behandlar skydd mot ljusbåge.

Texten börjar med att man ska ställa sig frågan, finns en risk för ljusbåge? Om den finns ska riskbedömningen innehålla:

- Hur vi genomför ett sådant arbete
- Termisk ljusbågsgräns (arc flash boundary, finns ingen etablerad översättning). Denna definieras av det avstånd där den termiska ljusbågsenergin är 5 J/cm^2 ($1,2 \text{ cal/cm}^2$)
- Val av PPE om $1,2 \text{ cal/cm}^2$ ska passeras.
- Riskbedömningen ska dokumenteras.
- Den termiska ljusbågsgränsen ska beräknas eller om möjligt väljas ur en tabell (130.7(C))
- Där så är möjligt (t.ex. olika typer av skåp) ska innehavaren märka utrustningen med, nominell spänning, termisk ljusbågsgräns, och minst en av följande: Termisk ljusbågsenergi och vilket arbetsavstånd det medför eller ljusbågskategori enligt tabell eller minimum av PPE eller särskilda krav för denna anläggning.
- Hur beräkningen har genomförts ska dokumenteras så att man vid en ändring i anläggningen kan se om det behövs en ny beräkning och ny märkning.
- Avståndet beräknas från arbetarens bröst eller ansikte. Kläder och övriga skydd skall passa och vara enkla att ta av och anpassade till den termiska ljusbågsenergin. Skydd av huvud (testad balaklava) tillsammans med ett testat ansiktsskydd ska användas om baksidan av huvudet finns inom området. Ljusbågstestad huva kan även användas. Om den förväntade termiska ljusbågsenergin överstiger 12 cal/cm^2 ska huva användas. Händer skyddas genom att använda läderhandskar med minst tjockleken $0,7 \text{ mm}$. I tester genomförda motsvarar dessa minst en ATPV på 10 cal/cm^2 . Grova läderskor ska användas om 4 cal/cm^2 överskrids för fötterna.
- Det finns med andra ord två avstånd som bör bestämmas den termiska ljusbågsgränsen (arc-flash boundary) och arbetsavstånd (working distance). Om arbetet utförs utanför den termiska ljusbågsgränsen behövs inga termiska skydd, om arbetet utförs innanför ska skydd användas. Om man väljer att inte utföra några beräkningar utan använder tabell så indelas PPE i fyra olika nivåer (arc flash PPE category), minst 4, 8, 25, 40 cal/cm^2 . För varje nivå finns även ytterligare krav.

Vid val av PPE ska nivån på PPE bestämmas med en av dessa metoder.



Figur 1 Val av metod för att bestämma PPE

Tabell 130.5(G) Val av ljusbågsklassade kläder och annan personlig skyddsutrustning när metoder för analys av den termiska ljusbågsenergin används

Den beräknade termiska ljusbågsenergin exponering är lika med 1,2 cal/cm² upp till och med 12 cal/cm²

- Ljusbågsklassade kläder med en klassificering lika med eller större än den beräknade infallande energin^a
- Ljusbågsklassad långärmad skjorta och byxor eller ljusbågsklassad overall eller ljusbågstestad dräkt (SR)
- Ljusbågsklassad visir och ljusbågsklassad balaklava eller ljusbågstestad huva (SR)^b
- Ljusbågstestade ytterkläder (t.ex. jacka, parkas, regnkläder, hjälmfodral, väl synliga kläder) (AN)^c

- Kraftiga läderhandskar, ljusbågstestade handskar eller isolerande gummihandskar med termiskt skydd (SR)^c
- Hjälms
- Skyddsglasögon eller skyddsglasögon (SR)
- Hörselskydd
- Skinn skor

Den beräknade termiska ljusbågsenergin exponering är större än 12 cal/cm²

- Ljusbågsklassade kläder med en ljusbågsklassificering lika med eller större än den beräknade infallande termiska energin^a
- Ljusbågsklassad långärmad skjorta och byxor eller ljusbågsklassad overall eller ljusbågsklassad dräkt (SR)
- Ljusbågsklassad huva
- Ljusbågsklassade ytterkläder (t.ex. jacka, parka, regnkläder, hjälmfodral, väl synliga kläder) (AN)^e
- Ljusbågsklassade handskar eller gummiisolerande handskar med skydd (SR)^c
- Hjälms
- Skyddsglasögon eller skyddsglasögon (SR)
- Hörselskydd
- Skinn skor

SR: Val av en i gruppen krävs.

AN: Efter behov (riskbedömning).

^aLjusbågsklassade kan vara för ett enda lager, såsom en ljusbågsklassad skjorta och byxor eller en overall, eller för en ljusbågstestad dräkt eller ett flerlayerssystem om det testas som en kombination bestående av en ljusbågsklassad skjorta och byxor, overall, och ljusbågstestad dräkt.

^bAnsiktsskydd med ett omslutande skydd för att skydda ansiktet, hakan, pannan, öronen och halsområdet krävs enligt 130.7(C)(10)(c). Där bakhuvudet är innanför den termiska ljusbåggränsen, ska en balaklava eller en ljusbågstestad huva användas för fullt skydd för huvud och nacke.

^cGummiisolerande handskar med skydd ger ljusbågsskydd utöver skydd mot elektrisk strömgenomgång. Gummiisolerande handskar av högre klass med skydd ger, på grund av sin ökade materialtjocklek, ett ökat ljusbågsskydd.

^dAndra skor än läder eller dielektriska ska tillåtas användas förutsatt att de har testats för att inte visa någon antändning, smältning eller dropp vid den beräknade infallande energiexponeringen.

^eLjusbågsklassificeringen för yttre skikt som bärs över ljusbågsklassade kläder som skydd mot väder och vind eller för andra säkerhetsändamål, och som inte används som en del av ett skiktat system, ska inte krävas vara lika med eller större än den beräknade infallande energin.

Val av PPE enligt kategorimetoden.

Vid val av PPE enligt denna metod är kraven på maximal kortslutningsström, maximal fränkopplingstid och minimalt arbetsavstånd listade och därefter kan valet av PPE genomföras och ett minsta avstånd fås, om dessa krav inte kan uppnås ska en analys av den termiska ljusbågsenergin genomföras.

Vid valet av PPE indelas dessa i fyra nivåer med krav på olika nivåer på skyddsutrustningen

Kategori 1: Högsta termisk ljusbågsenergi 4 cal/cm² (16,75 J/cm²)^a

Detta är den lägsta nivån som krävs. Kraven motsvarar ett lager av ljusbågstestade kläder. Följande utrustning krävs:

- Ljusbågstestad långärmad skjorta och byxor eller overall.
- Ljusbågstestad ansiktsskydd^b eller huva
- Ljusbågstestad jacka, väl synliga kläder, regnkläder, mössa (AN)^f
- Skyddsutrustning:
- Hjälms
- Skyddsglasögon eller heltäckande skyddsglasögon (SR)
- Hörselskydd (i hörselgången)^c
- Tjocka läderhandskar, ljusbågstestade handskar, eller isolerande handskar med skydd (SR)^d
- Läderskor^e (AN)

Kategori 2 : Högsta termisk ljusbågsenergi 8 cal/cm² (33,5 J/cm²)^a

Kraven kan oftast uppfyllas med ett lager av ljusbågstestade kläder. De flesta företag med exponeringar som kräver kategori 1 väljer vanligtvis kategori 2-kläder för att täcka båda kategorierna. Idag är komforten för kategori 1 och 2 jämförbar, så det är oftast mer vettigt att välja kategori 2-kläder. Följande utrustning krävs:

- Ljusbågstestad långärmad skjorta och byxor eller overall.
- Ljusbågstestad huva eller ansiktsskydd^b och ljusbågstestad balaklava
- Ljusbågstestad jacka, väl synliga kläder, regnkläder, mössa (AN)^f
- Skyddsutrustning:
- Hjälms
- Skyddsglasögon eller heltäckande skyddsglasögon (SR)
- Hörselskydd (i hörselgången)^c

- Tjocka läderhandskar, ljusbågstestade handskar, eller isolerande handskar med skydd (SR)^d
- Läderskor^e

Kategori 3 : Högsta termisk ljusbågsenergi 25 cal/cm² (104,7 J/cm²)^a

- Ljusbågstestad långärmad skjorta (AR)
- Ljusbågstestade byxor (AR)
- Ljusbågstestad overall (AR)
- Ljusbågstestad heltäckande dräkt med huva (AR)
- Ljusbågstestade handskar, eller isolerande handskar med skydd (SR)^d
- Ljusbågstestad jacka, väl synliga kläder, regnkläder, mössa (AN)^f
- Skyddsutrustning:
 - Hjälms
 - Skyddsglasögon eller heltäckande skyddsglasögon (SR)
 - Hörselskydd (i hörselgången)^c
- Läderskor^e

Kategori 4 : Högsta termisk ljusbågsenergi 40 cal/cm² (167,5 J/cm²)^a

- Ljusbågstestad långärmad skjorta (AR)
- Ljusbågstestade byxor (AR)
- Ljusbågstestad overall (AR)
- Ljusbågstestad heltäckande dräkt med huva (AR)
- Ljusbågstestade handskar, eller isolerande handskar med skydd (SR)^d
- Ljusbågstestad jacka, väl synliga kläder, regnkläder, mössa (AN)^f
- Skyddsutrustning:
 - Hjälms
 - Skyddsglasögon eller heltäckande skyddsglasögon (SR)
 - Hörselskydd (i hörselgången)^c
- Läderskor^e

AN: Om det behövs (frivilligt, enligt riskbedömning), AR: Enligt krav, SR: Val krävs

^aLjusbågstestad är definierad i NFPA70E artikel 100

^b Ansiktsskydd ska ha omslutande skydd för att skydda inte bara ansiktet utan även pannan, öronen och halsen, eller alternativt måste en ljusbågstestad huva användas.

^c Andra typer av hörselskydd är tillåtna att användas i stället för eller utöver hörselskydd i hörselgången förutsatt att de bärs under en ljusbågsklassad huva.

^d Gummiisolerande handskar med skydd ger ett ljusbågsskydd utöver skydd mot elektrisk strömgenomgång. Gummiisolerande handskar av högre klass med skydd ger på grund av sin ökade materialtjocklek ett ökat skydd mot ljusbåge.

^e Andra skodon än läder eller dielektriska kan tillåtas användas förutsatt att de har testats och klarat tester för antändning, smältning och droppning vid lägsta ljusbågsklassificering för respektive PPE-kategori.

^f Ljusbågsklassificeringen för det yttre skikt som bärs över ljusbågsklassade kläder som skydd mot väder och vind eller för andra säkerhetsändamål, och som inte används som en del av ett skiktat system, ska inte krävas vara lika med eller större än den uppskattade infallande energin.

I NFPA70E Tabell 130.7 (c)(15)(a) anges att skåp eller annan liknande utrustning märkt högre än 240 volt och upp till 600 volt med maximalt 25 kA tillgänglig kortslutningsström; maximalt 0,03 sek (2 cykler vid 60 Hz) fränkopplingstid och minsta arbetsavstånd 455 mm (18 tum) kan PPE kategori 2 väljas och den termiska ljusbågsgränsen sätts till 915 mm (3 ft)

Om vi istället väljer att ha maximal nominell spänning 400 V och fränkopplingstiden maximalt 0,04 sekunder (2 cykler vid 50 Hz). Den verkliga ljusbågsströmmen blir ca. 16 kA och fränkopplingstiden ca. 0,1 sekund. Detta innebär att vi hamnar på 4 cal/cm² och PPE kategori 2 bör väljas.

Detta är för de flesta kabelskåp en relativt hög kortslutningsström varför man bör överväga att välja även en lägre kortslutningsström t.ex. 10 kA. Den verkliga ljusbågsströmmen blir då ca. 7 kA och fränkopplingstiden ca. 0,1 sekund. Detta innebär att vi hamnar på 1,6 cal/cm² och PPE kategori 1 kan väljas.

Vi skulle även kunna ta med den kortslutningsström som ger under 1,2 cal/cm² vid samma fränkopplingstid och arbetsavstånd, 5 kA.

Vid vissa kopplingslägen eller parallellkopplade kablar kan denna fränkopplingstid vara svår att uppnå så om vi i stället väljer en längre fränkopplingstid t.ex. 5 sekunder och en kortslutningsström på 2 kA. Den verkliga ljusbågsströmmen blir då ca. 1,2 kA och skyddet kommer att lösa ut efter ca. 30 sekunder, vilket ger ca. 80 cal/cm². I detta fall kan vi inte använda en förenklade metod som denna.

Man kan se att om nätet är dimensionerat för fränkopplingstider på några sekunder så blir det svårt att ge några generella råd, beräkningsmetoden bör användas och en riskbedömning genomföras.

5 IEEE 1584, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations

Det första som krävs är den trefasiga kortslutningsströmmen där arbetet skall genomföras. Med hjälp av denna kan ljusbågsströmmen beräknas med olika formler och därmed med olika noggrannhet. Två avstånd kan beräknas, dels det avstånd där det inte behövs något skydd, om inget arbete ska utföras innanför det området kan man sluta där. Om ett arbete ska utföras innanför det tidigare beräknade avståndet beräknas en normerad ljusbågsenergi vid en fränkopplingstid på 0,2 sekunder och ett avstånd från ljusbågen beroende på vilken typ av arbete som ska utföras. Om man bedömer att detta räcker kan man stanna där, det vill säga att fränkopplingstiden är kortare och att man inte kommer att arbeta närmare och att man bedömer att den PPE som krävs blir rimlig ur arbetsmiljösynpunkt. Om skyddet löser ut snabbare kan man relativt enkelt räkna på det och minska på kraven. Om skyddet löser ut på en längre tid måste man korrigera enligt den tiden. Samma gäller om man kommer att arbeta närmare eller längre bort än det normerade avståndet.

Beräkningen steg för steg:

1. Hur ser anläggningen ut fysiskt, storlek på skåp och hur är ledningarna dragna
2. Beräkna ljusbågsströmmen, det finns två olika modeller beroende på om spänningen är över eller under 600 V. Strömmen beräknas först vid spänningarna 600, 2700, 14300 V och korrigeras sedan till den aktuella spänningen.

$$I_{\text{Ljusbågsström}} = 10^{K_1 + K_2 \cdot \lg I + K_3 \cdot \lg G} (K_4 I^6 + K_5 I^5 + K_6 I^4 + K_7 I^3 + K_8 I^2 + K_9 I + K_{10})$$

I = trefasig kortslutningsström

K_{1-10} = konstanter som bestäms av spänning (600, 2700, 14300) samt ledningsdragning (VCB, VCB, HCB, VOA, HOA, se förklaring nedan).

G = avståndet i millimeter mellan ledarna

3. Bestäm ljusbågsströmmen för den aktuella spänningen
4. Bestäm sedan fränkopplingstiden med hjälp av den framräknade ljusbågsströmmen
5. Beräkna ljusbågsenergin, det finns en hel del konstanter som ska bestämmas beroende på spänning, i skåp eller inte, skåpets dimensioner, hur ledningarna är dragna och hur långt ifrån som arbetet förväntas utföras.
6. Beräkna den termiska ljusbågsgränsen. Välj formel efter den aktuella spänningsnivån (600, 2700, 14300)

7. Då dessa värden inte kan anses exakta beräknas ett nytt värde på ljusbågsströmmen som är lite lägre och en ny fränkopplingstid tas fram. Gör sedan om beräkningarna och använd det resultat som ger den högsta ljusbågsenergin och den längsta termiska ljusbågsgränsen.

Det finns fem olika konfigurationer av hur ledningarna/skenorna är förlagda, dessa måste bestämmas då prov har visat olika resultat beroende på förläggningssätt.

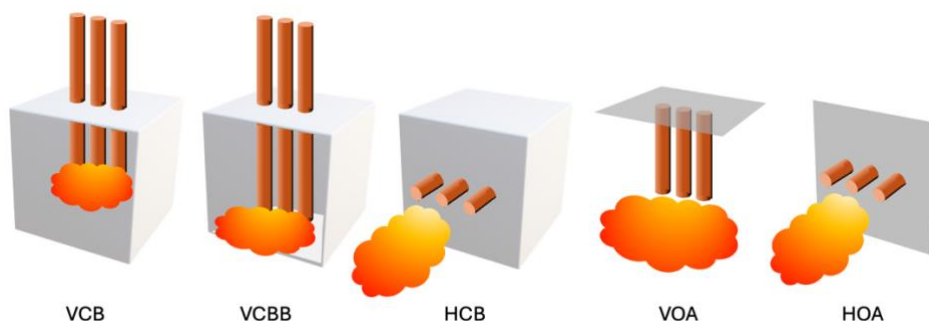
VCB: Vertikala ledare i metallskåp (Vertical conductors / electrodes in a metal box/enclosure)

VCBB: Vertikala ledare med en isolerad bariär i ett metallskåp (Vertical conductors / electrodes terminated in an insulating barrier in a metal box / enclosure)

HCB: Horisontella ledare i ett metallskåp (Horizontal conductors / electrodes in a metal box/ enclosure)

VOA: Vertikala ledare utan omslutning (Vertical conductors / electrodes in open air)

HOA: Horisontella ledare utan omslutning (Horizontal conductors / electrodes in open air)



Figur 2 Beskrivning av olika lägen på skenor för att bestämma den termiska ljusbågsenergin

5.1 ETT EXEMPEL PÅ HUR BERÄKNINGEN KAN SE UT

Har valt en 100 m lång FKKJ 3x70/35 direkt från en transformator och räknar då med att $Z_{\text{för}}$ blir ca 25 mΩ, och därmed den trefasiga kortslutningsströmmen ca 10 kA (mycket oexakt beräkning)

Beräkning av genomsnittlig ljusbågsström (kA) vid 600 V och VCB

Trefasig kortslutningström i kA	$I := 10$
Avstånd mellan ledare i mm	$G := 30$
$K1$	$K1 := -0.04287$
$K2$	$K2 := 1.035$
$K3$	$K3 := -0.083$
$K4$	$K4 := 0$
$K5$	$K5 := 0$
$K6$	$K6 := -4.783 \cdot 10^{-9}$
$K7$	$K7 := 1.962 \cdot 10^{-6}$
$K8$	$K8 := -0.000229$
$K9$	$K9 := 0.003141$
$K10$	$K10 := 1.092$
Basen för logaritm	$B := 10$

$$10^{(K1 + K2 \cdot \log(I, B) + K3 \cdot \log(G, B))} \cdot (K4 \cdot I^6 + K5 \cdot I^5 + K6 \cdot I^4 + K7 \cdot I^3 + K8 \cdot I^2 + K9 \cdot I + K10) = 8,164$$

Därefter ska ljusbågsströmmen för den aktuella spänningen ($U=0,4\text{kV}$ och ljusbågsströmmen vid 600 V $F=8,164\text{ kA}$) beräknas

$$\frac{1}{\sqrt[2]{\left(\frac{0.6}{U}\right)^2 \cdot \left(\left(\frac{1}{F^2}\right) - \left(\frac{0.6^2 - U^2}{0.6^2 \cdot I^2}\right)\right)}} = 6.858$$

F är ljusbågsströmmen vid 600 V

U är den aktuella spänningen

I är kortslutningsströmmen

Sedan beräknas en korrektionsfaktor CT för skåpets faktiska storlek

Beräkning av korrigeringsfaktor för skåpets storlek, CT

Detta görs om skåpets storlek är avviker från 508 mm i höjd och bredd eller om djupet är mindre än 203,2 mm

Om skåpet är mindre än 508 mm är $EES=20$, om skåpet är mellan 508 mm och 660,4 mm är $EES=0,03937 \cdot$ skåpets höjd och lika för bredd, om skåpet är större än 660,4 mm används de övre av nedanstående nedanstående formler.

Skåpets bredd i mm	$BR := 600$		
Skåpets höjd i mm	$H := 1200$		
Konstanter beroend på ledningsdragnings i skåpet	$A := 4$	$B := 20$	För VCB (A=10 för VCBB och HCB och B=24 för VCBB och 22 för HCB)

$$\left(660.4 + \left((BR - 660.4) \cdot \left(\frac{U+A}{B}\right)\right)\right) \cdot (25.4^{-1}) = 25.477 \quad BR1'$$

$$\left(660.4 + \left((H - 660.4) \cdot \left(\frac{U+A}{B}\right)\right)\right) \cdot \left(\frac{1}{25.4}\right) = 30.674 \quad H1'$$

$$BR' := 0.03937 \cdot BR \quad H' := 0.03937 \cdot H$$

Beräkning av ekvivalent skåpstorlek, EES

$$\frac{BR' + H1'}{2} = 27.148$$

Beräkning av korrektionsfaktor CF

$$(-0.000302 \cdot EES^2) + (0.03441 \cdot EES) + 0.4325 = 1.273$$

Nu kan den termiska ljusbågsenergin beräknas på ett avstånd D (i detta fall 300 mm) från ljusbågen. Har antagit en fränkopplingstid på 10 mS, om det är en 100 A knivsäkkring så kopplar den ifrån snabbare vid ca 7kA.

$D := 300$	$k1 := 0.753364$	$k7 := 0.000001962$	
	$k2 := 0.566$	$k8 := -0.000229$	
	$k3 := 1.752636$	$k9 := 0.003141$	
	$k4 := 0$	$k10 := 1.092$	
	$k5 := 0$	$k11 := 0$	
	$k6 := -4.783 \cdot 10^{-9}$	$k12 := -1.598$	
		$k13 := 0.957$	
Fränkopplingstid i mS	$t := 10$		
$\frac{12.552}{50} \cdot t \cdot 10^{\left(\frac{k1 + k2 \cdot \log(G, 10) + k3 \cdot \frac{F}{(k4 \cdot I^2 + k5 \cdot I^6 + k6 \cdot I^8 + k7 \cdot I^4 + k8 \cdot I^2 + k9 \cdot I^2 + k10 \cdot I^2)} + k11 \cdot \log(I, 10) + k12 \cdot \log(D, 10) + k13 \cdot \log(FV, 10) + \log\left(\frac{1}{CF}, 10\right) \right)} = 1.057 \quad \text{J/mm}^2$			

Beräkna sedan det avstånd där inget termiskt skydd behövs.

$$10^{\left(\frac{k1 + k2 \cdot \log(G, 10) + k3 \cdot \frac{F}{(k4 \cdot I^2 + k5 \cdot I^2 + k6 \cdot I^2 + k7 \cdot I^2 + k8 \cdot I^2 + k9 \cdot I^2 + k10 \cdot I^2)} + k11 \cdot \log(I, 10) + k13 \cdot \log(FV, 10) + \log\left(\frac{1}{CF}, 10\right) - \log\left(\frac{20}{t}, 10\right) \right)} = 113.156 \quad \text{mm}$$

I detta fall kan ett arbete utföras 114 mm ifrån den elektriska utrustningen utan att något termiskt skydd behövs.

Nu skall denna beräkning utföras en gång till med en lägre ljusbågsström för att se om värdet ökar. Detta kan bli fallet om fränkopplingstiden ökar när strömmen minskar. I detta fall antar vi att så inte är fallet då jag har räknat med en relativt långsam fränkopplingstid.

I bilaga H visar man resultaten av ett flertal test utförda med säkringar av typen Class RK1 och Class L, någon exakt motsvarighet används inte i Europa men kan jämföras med gG/gL men är mera lik aM vid kortslutning.

Testen har utförts med 600 V och mätningarna har utförts på 460 mm:s avstånd från ljusbågen. Man kan tydligt se att vid relativt höga kortslutningsströmmar i förhållande till säkringens märkström blir energierna relativt låga. Man ser att om ljusbågsströmmen är mer än 15 till 20 gånger större än märkströmmen är energierna relativt låga. För säkringar upp till 1600 A under 3 J/cm² (0,72 cal/cm²). Man ser även att energierna ökar när kortslutningsströmmen minskar. Exemplet visar bland annat en 200 A säkring med kortslutningsströmmen 3,2 kA där energin blir 0,21 J/cm² (0,05 cal/cm²) om kortslutningsströmmen minskas till 1,6 kA blev energin 5,4 J/cm² (1,29 cal/cm²) om kortslutningsströmmen minskas ytterligare till 1,16 kA blev energin 63 J/cm² (15,06 cal/cm²). Liknande resultat fås för alla säkringar som testats. Slutsatsen som bör dras är att det är de låga kortslutningsströmmarna som kan ge höga värden. En annan sak som även konstateras är att det vid korta fränkopplingstider, några millisekunder, är det svårt att beräkna energin och man gör bedömningen att man bör räkna med 10 ms och om detta ger tillfredställande värden kan man utgå från detta i annat fall bör bilaga H i standarden användas för att ge en mera exakt bedömning.

5.2 ETT MERA KONKRET EXEMPEL PÅ LANDSBYGGDSNÄT

Transformator 160 kVA, och kortslutningseffekt 40 MVA ($u_z = 4\%$)

Detta ger en kortslutningsström $I_{k3, \max} = 6 \text{ kA}$ och $I_{k, \min} = 6 \text{ kA}$. (nära en transformator är normalt det enfasiga felet lite större än trefasig kortslutning)

Om man använder en säkring av typen gTr AC 400 V, och de olika ljusbågsströmmarna beräknas

$$I_{VCB} = 3,7 \text{ kA} \quad I_{VOA} = 2,8 \text{ kA}$$

$$I_{HCB} = 3,4 \text{ kA} \quad I_{HOA} = 2,38 \text{ kA}$$

$$I_{VCBB} = 4,1 \text{ kA}$$

Detta ger fränkopplingstiderna

$$t_{VCB} = 30 \text{ ms} \quad t_{VOA} = 70 \text{ ms}$$

$$t_{HCB}=30 \text{ ms} \quad t_{HOA}=100 \text{ ms}$$

$$t_{VCBB}=40 \text{ ms}$$

Vi antar att arbetet ska utföras vid ett skåp med dimensionen 600x900 och att arbetsavståndet är 400 mm. Detta ger följande energinivåer vid 400 mm från skåpet.

$$E_{VCB}=0,34 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{HCB}=0,75 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{VCBB}=0,54 \text{ cal/cm}^2$$

Om arbetet utförs utan skåpväggar och på 400 mm avstånd blir resultatet

$$E_{VOA}=0,35 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{HOA}=1,22 \text{ cal/cm}^2$$

Om arbetet skall utföras i ett kabelskåp 56 meter bort från transformatorn och den matas med en FKKJ 3x70/35. Säkring 63 A. Minsta avståndet mellan spänningsförande delar är 30 mm i skåpet där arbetet skall utföras. Skåpet har måtten 600x900 mm arbetet skall utföras på ett avstånd av minst 300 mm.

$$I_{k3, \max}=3,8 \text{ kA} \text{ och } I_{k, \min}=3,1$$

Detta ger följande ljusbågsströmmar

$$I_{VCB}=2 \text{ kA} \quad I_{VOA}=1,7 \text{ kA}$$

$$I_{HCB}=2 \text{ kA} \quad I_{HOA}=1,5 \text{ kA}$$

$$I_{VCBB}=2,2 \text{ kA}$$

Detta ger fränkopplingstiderna

$$t_{VCB}=1 \text{ mS} \quad t_{VOA}=4 \text{ mS}$$

$$t_{HCB}=1 \text{ mS} \quad t_{HOA}=5 \text{ mS}$$

$$t_{VCBB}=1 \text{ mS}$$

Vi antar att arbetet ska utföras vid ett skåp med dimensionen 600x900 och att arbetsavståndet är 300 mm. Detta ger följande energinivåer vid 300 mm från skåpet. Vi följer även rådet i Bilaga H och räknar med en fränkopplingstid på 10 mS. Det innebär att energierna kommer att vara klart lägre än beräknat.

$$E_{VCB}=0,09 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{HCB}=0,23 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{VCBB}=0,12 \text{ cal/cm}^2$$

Om arbetet utförs utan skåpväggar och på 300 mm avstånd blir resultatet

$$E_{VOA}=0,04 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{HOA}=0,12 \text{ cal/cm}^2$$

Nästa kabelskåp är 42 meter bort och kabeln är en EKKJ 3x10/10 och avsäkras med 35 A säkring.

$I_{k3, \max}=0,811 \text{ kA}$ och $I_{k, \min}=0,64 \text{ kA}$. Arbetet skall genomföras i ett kabelskåp dimensionen 600x900 med minsta avstånd mellan ledare 30 mm och på ett minsta avstånd på 300 mm.

Detta ger följande ljusbågsströmmar

$$I_{VCB}=0,38 \text{ kA} \quad I_{VOA}=0,31 \text{ kA}$$

$$I_{HCB}=0,4 \text{ kA} \quad I_{HOA}=0,3 \text{ kA}$$

$$I_{VCBB}=0,45 \text{ kA}$$

Detta ger fränkopplingstiderna

$$t_{VCB}=25 \text{ mS} \quad t_{VOA}=80 \text{ mS}$$

$$t_{HCB}=25 \text{ mS} \quad t_{HOA}=80 \text{ mS}$$

$$t_{VCBB}=30 \text{ mS}$$

Vi antar att arbetet ska utföras vid ett skåp med dimensionen 600x900 och att arbetsavståndet är 300 mm. Detta ger följande energinivåer vid 300 mm från skåpet.

$$E_{VCB}=0,04 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{HCB}=0,11 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{VCBB}=0,06 \text{ cal/cm}^2$$

Om arbetet utförs utan skåpväggar och på 300 mm avstånd blir resultatet

$$E_{VOA}=0,06 \text{ cal/cm}^2$$

$$E_{HOA}=0,18 \text{ cal/cm}^2$$

6 DUGV 203-077 Thermal hazards due to electric fault arcing

Denna rekommendation som framtagits i Tyskland ger underlag för hur beräkning och riskhantering bör utföras för att undvika de skador som värmen från en ljusbåge kan orsaka. I denna text så kommer endast beräkningarna att redovisas med några få undantag.

Till att börja med kontrolleras om någon beräkning behövs, med andra ord finns det någon risk för ljusbåge. Om så är fallet finns det några undantag där ingen beräkning behövs utan energin från ljusbågen anses så låg att inga bestående skador uppstår.

- När mätning eller arbete utförs på kontrollutrustning som har en matande avsäkring upp till och med 25 A
- Vid matningsspänning upp till 400 V och avsäkring upp till och med 63 A. Arbetarna måste ha heltäckande kläder (armar och ben täckta)
- Vid matningsspänning upp till 400 V och kortslutningsströmmen är under 1 kA. I dessa fall kommer ljusbågen att vara instabil och slockna snabbt

Följande data måste först insamlas för att beräkningen ska kunna genomföras

U_n =Nominell spänning (fasspänning)

S_k =Trefasig kortslutningseffekt

t_k = Skyddets fränkopplingstid

Dessa värden kan krävas om en mera detaljerad beräkning ska genomföras

R/X =Kvoten mellan nätets resistiva och induktiva resistans

d =Avståndet mellan två spänningssatta komponenter

För att bedöma fränkopplingstiden behövs skyddets fränkopplingskaraktistik och strömmen vid ljusbågen. Att beräkna ljusbågsströmmen är svårt då den beror på många faktorer och man kan välja att vid den förenklade metoden att i stället anta att den vid lågspänning halveras och vid högspänning blir lika som vid stum kortslutning det vill sägs

$I_{k, \text{ljusbåge}} = 0,5 \cdot I_{k3, \text{min}}$ (vid lågspänning)

$I_{k, \text{ljusbåge}} = 1 \cdot I_{k3, \text{min}}$ (vid högspänning)

Denna ström används för att få fram fränkopplingstiden t_k . Denna fränkopplingstid blir oftast längre än den verkliga fränkopplingstiden men är på den säkra sidan.

För att beräkna ljusbågsenergin används den elektriska effekten vid ljusbågen $P_{\text{ljusbåge}}$ och tiden som ljusbågen existerar $t_{\text{ljusbåge}}$ (som är lika med fränkopplingstiden t_k)

$$W_{\text{Ljusbåge}} = P_{\text{Ljusbåge}} \cdot t_{\text{Ljusbåge}}$$

Den elektriska effekten $P_{\text{Ljusbåge}}$ är beroende av ljusbågens formation och utformningen av de spänningssatta komponenterna vid felstället.

Effekten vid ljusbågen kan beräknas genom att använda en konstant k_p och kortslutningseffekten S_k .

$$P_{\text{Ljusbåge}} = k_p \cdot S_k$$

k_p kan bestämmas om man vet spänning, avstånd mellan spänningsförande komponenter och förhållandet mellan R/X . Om kvoten R/X är obekant kan k_p sättas till 0,5. Beräkningen blir inte heller exakt varför man oftast väljer den ur tabell eller med en enklare formel. För att vara på den säkra sidan kan följande formel för att beräkna $k_{p,\max}$ användas.

$$k_{p,\max} = 0,29 / (R/X)^{0,17}$$

om avståndet a och kvoten R/X är kända kan tabellen nedan användas för att komma närmare det exakta värdet på k_p .

Nominell spänning	Avstånd mellan spänningsförande delar d (mm)	Kvot mellan resistans och induktans R/X	k_p
400 V	30	0,2	0,029
		0,5	0,215
		1	0,199
		≥ 2	0,181
	45	0,2	0,289
		0,5	0,263
		1	0,240
		≥ 2	0,222
	60	0,2	0,338
		0,5	0,299
		1	0,270
		≥ 2	0,253
10–20 kV	120–240	0,1	0,04–0,08

Tabell 2 Bestämning av K_p

Det bör observeras att vid användandet av dessa värden så blir beräkningen enklare men till kostnaden av en exaktare beräkning. Detta kan innebära att det

beräknade värdet på ljusbågsenergin kan bli klart högre än i verkligheten, särskilt om maxvärdet används. Detta kan innebära att ett skydd som inte krävs används och att det blir onödigt obekvämt att genomföra arbetet.

Om skenorna avslutas mot montören bör dessa värden användas och ingen mera detaljerad beräkning genomförs, då kan dettas anses vara det sämsta fallet.

Ljusbågens utvecklade energi (högsta) kan nu beräknas enligt formeln

$$P_{\text{ljusbåge}} = k_{p,\text{max}} \cdot S_k$$

Eller om man vill använda den maximala trefasiga kortslutningsströmmen istället $I_{k3,\text{max}}$.

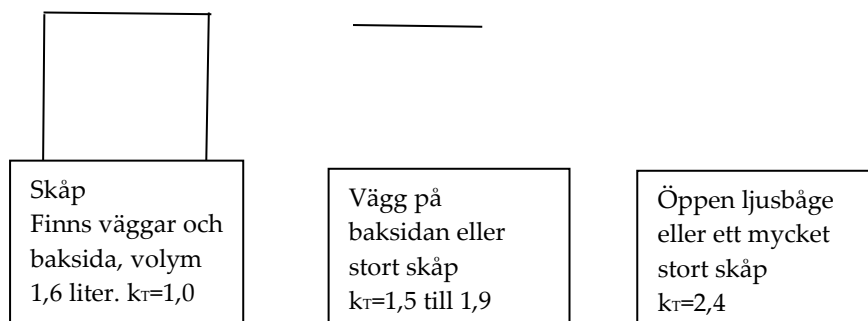
$$W_{\text{ljusbåge}} = k_{p,\text{max}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3,\text{max}} \cdot t_k$$

Därefter kan vi bestämma nivån på den personliga skyddsutrustningen PPE som krävs.

Den skyddsnivå $W_{\text{ljusbåge,skydd}}$ som ges av det PPE som valts är bestämt genom testnivån, avståndet a från ljusbågen och installationens geometri.

Avståndet a är avståndet mellan ljusbågen och personens bröstkorg, om flera uppgifter ska utföras används det kortaste avståndet. Det antas att avståndet inte blir kortare än 300 mm. För andra delar av kroppen som händer är det troligt att de kommer närmare och därför är skydd av händerna svårt och kan endast ske i begränsad omfattning. Det rekommenderas dock att ljusbågstestade handskar används då praktiska fall har visat att man reagerar genom att snabbt dra bort händerna vid en ljusbåge och därmed kan handskar ge ett relativt bra skydd.

Transmissionsfaktorn k_T bestäms genom utrustningens geometri. En liten anläggning med liten öppning innebär att större delen av energin strålar ut ur skåpet i en riktning, om anläggningen är större och öppningen större kommer värmestrålningen att spridas mera.



Figur 3 Bestämning av transmissionsfaktorn K_T

Det finns idag två nivåer av skydd APC 1 (168 kJ) och APC 2 (320 kJ), dessa gäller då för den konfiguration som är vid skyddets testning ($a=300$ mm och litet skåp med volymen $1,6 \text{ dm}^3$). Dessa kan räknas om vid andra avstånd, a eller annan geometri k_T .

$$W_{\text{lusbåge,skydd}} = k_T \cdot (a/300)^2 \cdot W_{\text{lusbåge, test}} \quad (a \text{ större eller lika med } 300 \text{ mm})$$

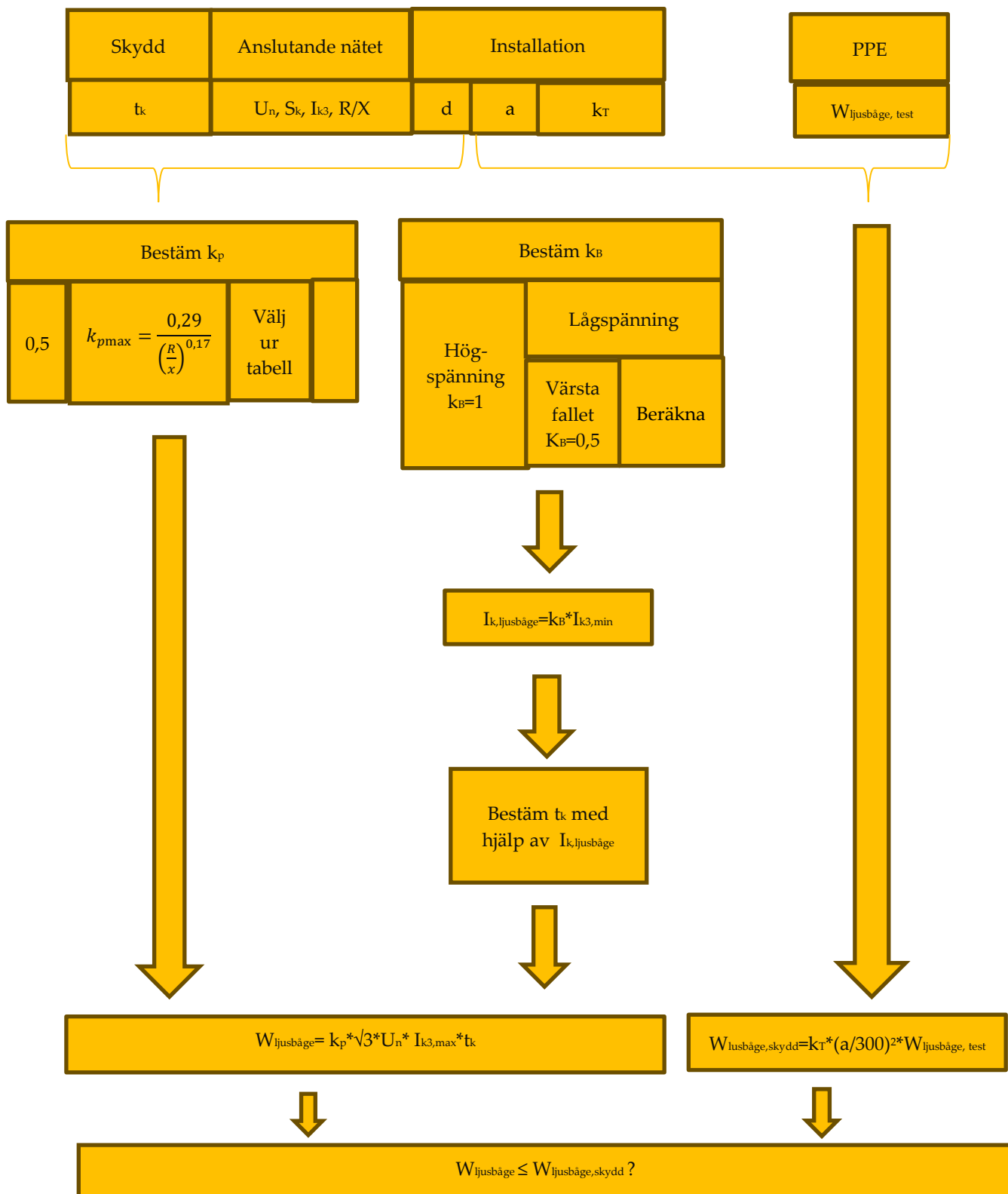
Vid val av PPE gäller nu att

$$W_{\text{lusbåge}} \leq W_{\text{lusbåge,skydd}}$$

Med hjälp av ovanstående ekvationer kan även andra förhållanden beräknas, såsom:

- Maximal kortslutningsström för denna anläggning
- Maximal utlösningstid för skydd
- Hur nära arbetet kan utföras med det skydd man har

Metodbeskrivning för att välja PPE



Figur 4 Metodbeskrivning för val av PPE enligt DUGV 203-077

6.1 ETT EXEMPEL PÅ HUR BERÄKNINGEN KAN SE UT

Anta att kortslutningsströmmen är 10 kA och att avståndet mellan spänningsförande delar är 30 mm, $R/X=0,5$ samt att spänningen är 400 V. Säkring är 100 A smältsäkring.

Börja då med att bestämma k_p . Om man är osäker på avståndet a och R/X kan man anta k_p till 0,5 i detta fall vet vi kvoten och k_{pmax} kan beräknas (men blir alltid för stor).

$$k_{pmax} = \frac{0,29}{(0,5)^{0,17}}$$

Det innebär att $k_{pmax}=0,326$, om vi i stället använder avståndet $a=30$ mm kan man ur tabell se att k_p kan väljas till 0,215.

Sedan skall ljusbågsströmmen $I_{k,ljusbåge}$ beräknas och då detta är lågspänning kan vi halvera strömmen, $I_{k,ljusbåge}=5$ kA, sedan tas fränkopplingstiden fram från skyddets ström-tidkurva. I detta fall har man inga kurvor att tillgå och för att vara på den säkra sidan antas tiden till 0,1 sekunder.

Nu kan den termiska ljusbågsenergin beräknas

$$W_{ljusbåge} = k_{p,max} \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3,max} \cdot t_k$$

$$W_{ljusbåge} = 0,326 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10 \cdot 0,1 = 225,86 \text{ kJ}$$

För att bestämma vilket skydd som behövs beräknas nu hur mycket energi som skyddet motstår. Vi antar att skåpet är medelstort och detta ger att $k_T=1,5$ samt att åtgärden inte kommer att utföras närmare än 300 mm ifrån spänningssatta delar.

$$\text{För APC 1 är } W_{ljusbåge, test APC1} = 168 \text{ kJ}$$

$$\text{För APC 2 är } W_{ljusbåge, test APC2} = 320 \text{ kJ}$$

$$W_{ljusbåge,skydd} = k_T \cdot (a/300)^2 \cdot W_{ljusbåge, test}$$

$$W_{ljusbåge,skydd APC 1} = 1,5 \cdot (300/300)^2 \cdot 168 = 252 \text{ kJ}$$

Då $W_{ljusbåge,skydd APC 1}$ är större än $W_{ljusbåge}$ kan APC 1 användas

Om vi nu väljer att räkna lite mera exakt, och finner att säkringen kommer att lösa ut på kortare tid än 10 ms och $k_p=0,215$.

$$W_{ljusbåge} = 0,215 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10 \cdot 0,01 = 14,9 \text{ kJ}$$

Nu är energin lägre än 50 kJ varför vi inte behöver använda PPE, utan det räcker med heltäckande kläder på kroppen. Om händerna skall vara i närheten av spänningsförande delar rekommenderas alltid handskar.

6.2 ETT MERA KONKRET EXEMPEL PÅ LANDSBYGGDSNÄT

Transformator 160 kVA, och kortslutningseffekt 40 MVA ($u_z = 4\%$)

Detta ger en kortslutningsström $I_{k3,max} = 6$ kA och $I_{k,min} = 6$ kA. (nära en transformator är normalt det enfasiga felet lite större än trefasig kortslutning)

Om man använder en säkring av typen gTr AC 400 V, och $I_{k,ljusbåge} = 0,5 \cdot 6 = 3$ kA.
Detta ger en utlösningstid på 0,1 sekunder.

Arbetet utförs i ett normalstort skåp på ett avstånd av 400 mm

I detta fall kan vi anta att induktansen är klart större än resistansen varför vi kan anta att $R/X = 0,2$ och detta medför att $k_{p,max} = 0,38$. Om man vet avståndet mellan spänningsförande ledare så kan ett mera korrekt värde fås, och när R/X är litet och ledarna ligger nära varandra blir felet större. Så om vi vet att minsta avståndet är 60 mm så kan $k_{p,max}$ fås ur tabell och blir då 0,338.

Energien kan nu beräknas

$$W_{ljusbåge} = k_p \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3,max} \cdot t_k$$

$$0,338 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 6 \cdot 0,1 = 140 \text{ kJ}$$

Nu skall PPE väljas,

För APC 1 är $W_{ljusbåge, test APC1} = 168$ kJ

För APC 2 är $W_{ljusbåge, test APC2} = 320$ kJ

$$W_{ljusbåge, skydd} = k_T \cdot (a/300)^2 \cdot W_{ljusbåge, test}$$

$$W_{ljusbåge, skydd APC 1} = 1,5 \cdot (400/300)^2 \cdot 168 = 448 \text{ kJ}$$

Detta innebär att vi kan välja APC 1 för denna uppgift.

Om arbetet skall utföras i ett kabelskåp 56 meter bort från transformatorn och den matas med en FKKJ 3x70/35. Säkring 63 A. I detta fall är $R/X = 0,5$. Minsta avståndet mellan spänningsförande delar är 30 mm i skåpet där arbetet skall utföras. Skåpet är normalstorlek och arbetet skall utföras på ett avstånd av minst 300 mm.

$I_{k3,max} = 3,8$ kA och $I_{k,min} = 3,1$

k_p väljs ur tabell när R/X (0,5) och a (30 mm) är kända, detta ger $k_p = 0,215$

För att bedöma fränkopplingstiden antas ljusbågsströmmen till $0,5 \cdot I_{k,min}$ det vill säga $0,5 \cdot 3,1 = 1,55$ kA

Fränkopplingstiden för 63 A säkring vid 1,55 kA är $< 0,02$ sekunder.

Lusbågsenergin kan nu beräknas

$$W_{ljusbåge} = k_p \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3,max} \cdot t_k$$

$$W_{ljusbåge} = 0,215 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 3 \cdot 0,02 = 8,94 \text{ kJ}$$

Nu är energin lägre än 50 kJ varför vi inte behöver använda PPE, utan det räcker med heltäckande kläder på kroppen. Om händerna skall vara i närheten av spänningsförande delar rekommenderas alltid handskar.

Nästa kabelskåp är 42 meter bort och kabeln är en EKKJ 3x10/10 och avsäkras med 35 A säkring.

$I_{k3, \max}=0,811 \text{ kA}$ och $I_{k, \min}=0,64 \text{ kA}$ och R/X är större än 2. Arbetet skall genomföras i ett normalstort kabelskåp med minsta avstånd mellan ledare 30 mm och på ett minsta avstånd på 300 mm.

k_p väljs ur tabell när $R/X (\geq 2)$ och a (30 mm) är kända, detta ger $k_p=0,181$

För att bedöma fränkopplingstiden antas ljusbågsströmmen till $0,5 \cdot I_{k, \min}$ det vill säga $0,5 \cdot 0,64=0,32 \text{ kA}$

Fränkopplingstiden för 35 A säkring vid 0,32 kA är 0,2 sekunder.

Lusbågsenergin kan nu beräknas

$$W_{\text{lusbåge}} = k_p \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3, \max} \cdot t_k$$

$$W_{\text{lusbåge}} = 0,181 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,811 \cdot 0,2 = 20 \text{ kJ}$$

Nu är energin lägre än 50 kJ varför vi inte behöver använda PPE, utan det räcker med heltäckande kläder på kroppen. Om händerna skall vara i närheten av spänningsförande delar rekommenderas alltid handskar. Då kortslutningsströmmen är under 1 kA är det mycket troligt att ljusbågen blir instabil och självslocknar, den kan dock tändas och slockna flera gånger men det antas att montören kan avlägsna sig från närheten av ljusbågen och att ingen PPE därför krävs.

Om så önskas kan man använda testresultaten från kläderna till att beräkna maximal kortslutningsström (3-fas), maximal fränkopplingstid och minimalt arbetsavstånd

$$I_{k3} = \sqrt{\frac{91}{U_n \cdot t_k \cdot k_p}} \cdot \left(\frac{a}{300}\right)^2 \cdot k_T \quad (\text{vid APC 1})$$

$$I_{k3} = \sqrt{\frac{184}{U_n \cdot t_k \cdot k_p}} \cdot \left(\frac{a}{300}\right)^2 \cdot k_T \quad (\text{vid APC 2})$$

$$t_k = \frac{91}{U_n \cdot I_{k3}^2 \cdot k_p} \cdot \left(\frac{a}{300}\right)^2 \cdot k_T \quad (\text{vid APC 1})$$

$$t_k = \frac{184}{U_n \cdot I_{k3}^2 \cdot k_p} \cdot \left(\frac{a}{300}\right)^2 \cdot k_T \quad (\text{vid APC 2})$$

$$a = 300 \cdot \sqrt{\frac{k_p \cdot U_n \cdot I_{k3}^2 \cdot t_k}{k_T \cdot 91}} \quad (\text{vid APC 1})$$

$$a = 300 \cdot \sqrt{\frac{k_p \cdot U_n \cdot I_{k3}^2 \cdot t_k}{k_T \cdot 184}} \quad (\text{vid APC 2})$$

7 Erfarenhetsmässiga jämförelser mellan ATPV och box test

Testmetoderna i standarderna IEC 61482-1-1 och IEC 61482-1-2 är helt olika och kan inte jämföras. Men det finns likheter som hur man mäter ljusbågsenergin med kalorimätare och dess utvärdering med hjälp av Stollkurvan för en andra gradens brännskada. Det finns ingen matematisk modell för att transformera resultatet mellan de olika testmetoderna. Det skulle dock vara möjligt att göra detta med en grov empirisk modell.

Det har gjorts försök med vävda tyger där de har testats enligt boxmetoden och ATPV. Det man har kommit fram till är att APC 1 täcker ett stort område mellan 4-30 cal/cm², området mellan 24 och 34 cal/cm² är en osäker zon där tyget ibland passerar eller underkänns beroende på tygets egenskaper.

Dessa siffror får inte användas som underlag för en riskbedömning vid ett arbete utan ska endas ses som ett försök till jämförelse.

8 Exempel på beräkningar

8.1 EXEMPEL PÅ BERÄKNINGAR ENLIG DUGV 203-077

Följande exempel är beräknade för skåp med storleken 900x600 mm och 30 mm mellan ledarna och huvudspänningen 400 V och $R/X > 1$. Den maximala fränkopplingstiden är vid stum kortslutning och den beräknade kortslutningsströmmen. Rekommendationen är att alltid använda heltäckande kläder även om inget PPE krävs.

Kortslutningsström (kA)	Maximal Säkring (A)	Arbetsavstånd	Fränkopplingstid (mS)	R/X Okänt	R/X Känt	R/X och d Känt	
10	250	300	<10	Inget PPE			
6			<10	Inget PPE			
4		300	-	- (1sek)	- (1 sek)	APC2+ 410 kJ (0,7 sek)	
		455	-	-		APC1	
		610		APC2+ 410 kJ	APC 2	APC1	
2		300	>10 sek	-	APC2+ 410 kJ	APC 2	Vid användande av 1 sek.
		455		APC 2	APC 2	APC 1	Vid användande av 1 sek.
		610		APC1	APC1	APC1	Vid användande av 1 sek.
10	100	300	<10	Inget PPE krävs			
6				Inget PPE krävs			

4				Inget PPE krävs			
2				APC1 (0,1 sek.)	Inget PPE krävs		
1		300	>1 sek.	APC2+ 410 kJ	APC 2	APC 1	Vid användande av 1 sek.
		455		APC1	APC1	APC1	Vid användande av 1 sek.
		610		APC1	APC1	APC1	Vid användande av 1 sek.
10	63	300	<10	Inget PPE krävs			
1		300	<401	APC1	APC1	Ingen PPE krävs	

Tabell 3 Exempel på beräkning enligt DUGV 203-077 med olika kortslutningsströmmar och olika arbetsavstånd

8.2 FÖLJANDE EXEMPEL ÄR BERÄKNADE ENLIGT IEEE 1584

Beräkningarna är utförda med skåp av storleken 600x600 mm och 32 mm mellan ledarna samt huvudspänningen 400 V. Den maximala fränkopplingstiden är vid stum kortslutning och den beräknade kortslutningsströmmen. Inom parentes anges om beräkningen utförts vid en annan tid än den som fås vid kortslutningsströmmen det vill säga att i dessa fall har ljusbågsströmmen använts. I IEEE 1584 anges att för snabbare brytförlopp än 10 ms kan denna tid användas, den verkliga tiden har vid prov visat sig vara kortare och energierna relativt små men svåra att beräkna (se IEEE 1584 bilaga H). Om en större säkring än den som anges i tabellen används men fränkopplingstiden är kortare än den maximala fränkopplingstiden kan resultaten i tabellen användas. Om avståndet mellan ledare ökas så att ljusbågen kan bli längre minskar ljusbågsströmmen och detta kan leda till längre fränkopplingstider och högre energier. Även magnetfältet i skåpet kan påverka ljusbågens utsträckning. Detta gör att längden på ljusbågen är svår att förutsäga och om detta kommer att ge en längre eller kortare fränkopplingstid. Om skåpstorleken ökas så blir energierna mindre om allt annat är detsamma. I normalfallet har skåpstorlek och avstånd mellan faserna en mindre betydelse då man i riskbedömningen bör ha en god marginal till den beräknade termiska energin.

Kortslutningsström. I_k (kA)	Säkring (A)	Arbets- avstånd D (mm)	Maximal frånkopp- lingstid mS	Termisk ljusbågsenergi cal/cm ²	Termisk ljusbågsgräns mm	Ljusbågs- ström kA
40	200	300	<10	1,168 (E_{VCB})	295	24
				2,826 (E_{HCB})	458	23
				1,855 (E_{VCBB})	382	28
				0,545 (E_{VOA})	182	20
				1,286 (E_{HOA})	311	17
		450	<10	0,611 (E_{VCB})		
				1,241 (E_{HCB}) 0,891 (E_{VCBB}) 0,283 (E_{VOA}) 0,574 (E_{HOA})		
		600	<10	0,386 (E_{VCB})		
				0,692 (E_{HCB}) 0,530 (E_{VCBB}) 0,179 (E_{VOA}) 0,324 (E_{HOA})		
30	200	300	<10	0,929 (E_{VCB})	256	20
				2,248 (E_{HCB})	409	19
				1,442 (E_{VCBB})	332	22
				0,427 (E_{VOA})	157	16
				1,024 (E_{HOA})	277	13
		450	<10	0,486 (E_{VCB})		
				0,987 (E_{HCB}) 0,693 (E_{VCBB}) 0,223 (E_{VOA}) 0,457 (E_{HOA})		
		600	<10	0,307 (E_{VCB})		
				0,55 (E_{HCB}) 0,412 (E_{VCBB})		

				0,141 (E_{VOA}) 0,258 (E_{HOA})		
20	200	300	<10	0,633 (E_{VCB}) 1,527 (E_{HCB}) 0,938 (E_{VCBB}) 0,288 (E_{VOA}) 0,707 (E_{HOA})	201 338 262 123 230	14 13 15 11 9
		450	<10	0,331 (E_{VCB}) 0,671 (E_{HCB}) 0,45 (E_{VCBB}) 0,151 (E_{VOA}) 0,315 (E_{HOA})		
		600	<10	0,209 (E_{VCB}) 0,374 (E_{HCB}) 0,268 (E_{VCBB}) 0,095 (E_{VOA}) 0,178 (E_{HOA})		
10	200	300	2 (20)	0,605 (E_{VCB}) 1,466 (E_{HCB}) 0,828 (E_{VCBB}) 0,272 (E_{VOA}) 0,702 (E_{HOA})	196 331 245 119 230	7 6 7 6 5
		450	2 (20)	0,316 (E_{VCB}) 0,644 (E_{HCB}) 0,397 (E_{VCBB}) 0,142 (E_{VOA}) 0,313 (E_{HOA})	196 331 245 119 230	
		600	2 (20)	0,2 (E_{VCB}) 0,359 (E_{HCB}) 0,236 (E_{VCBB}) 0,09 (E_{VOA})	196 331 245 119	

				0,177 (E_{HOA})	230	
5	200	300	10 (200)	2,797 (E_{VCB})	510	3,3
				6,936 (E_{HCB})	712	3,1
				3,631 (E_{VCBB})	554	3,5
				1,249 (E_{VOA})	308	2,7
				3,398 (E_{HOA})	506	2,4
		450	10 (200)	1,463 (E_{VCB})		
				3,045 (E_{HCB})		
				1,744 (E_{VCBB})		
				0,653 (E_{VOA})		
				1,516 (E_{HOA})		
		600	10(200)	0,924 (E_{VCB})		
				1,698(E_{HCB})		
				1,036 (E_{VCBB})		
				0,413 (E_{VOA})		
				0,855 (E_{HOA})		
5	100	300	1,5 (10)	0,14 (E_{VCB})	78	3,3
				0,347 (E_{HCB})	163	3,1
				0,182 (E_{VCBB})	106	3,5
				0,062 (E_{VOA})	47	2,7
				0,17 (E_{HOA})	112	2,4
5	200	300	10 (100)	1,398 (E_{VCB})	330	
				3,468 (E_{HCB})	506	
				1,816 (E_{VCBB})	377	
				0,624 (E_{VOA})	200	
				1,699 (E_{HOA})	358	
		450	10 (100)	0,732 (E_{VCB})	330	
				1,523(E_{HCB})	506	
				0,872 (E_{VCBB})	377	
				0,327 (E_{VOA})	358	
				0,758 (E_{HOA})	358	

2	100	300	15 (200)	1,007 (E _{VCB})	269	1,2
				2,624 (E _{HCB})	441	1,2
				1,263 (E _{VCBB})	309	1,4
				0,445 (E _{VOA})	161	1,0
				1,295 (E _{HOA})	311	0,95
		450	15 (200)	0,527 (E _{VCB}) 1,152 (E _{HCB}) 0,607 (E _{VCBB}) 0,233 (E _{VOA}) 0,578 (E _{HOA})		
1	100	300	200 (2000)	0,333 (E _{VCB})		
				0,642 (E _{HCB})		
				0,36 (E _{VCBB})		
				0,147 (E _{VOA})		
				0,326 (E _{HOA})		
		600	15 (200)	0,333 (E _{VCB}) 0,642 (E _{HCB}) 0,36 (E _{VCBB}) 0,147 (E _{VOA}) 0,326 (E _{HOA})		
1	100	300	200 (2000)	4,675 (E _{VCB})	703	0,6
				12,725 (E _{HCB})	960	0,6
				5,793 (E _{VCBB})	717	0,7
				2,043 (E _{VOA})	419	0,5
				6,247 (E _{HOA})	687	0,47
		450	200 (2000)	2,446 (E _{VCB}) 5,587 (E _{HCB}) 2,782 (E _{VCBB}) 1,069 (E _{VOA}) 2,788 (E _{HOA})	703 960 717 419 687	
1	100	300	200 (2000)	1,544 (E _{VCB})	703	
				3,116 (E _{HCB})	960	
				1,653 (E _{VCBB})	717	
				0,675 (E _{VOA})	419	
				1,573 (E _{HOA})	687	
		600	200 (2000)	1,544 (E _{VCB}) 3,116 (E _{HCB}) 1,653 (E _{VCBB}) 0,675 (E _{VOA}) 1,573 (E _{HOA})	703 960 717 419 687	
1	63	300	30 (100)	0,234 (E _{VCB})	108	

				0,636 (E_{HCB})	220	
				0,29 (E_{VCBB})	137	
				0,102 (E_{VOA})	65	
				0,312 (E_{HOA})	153	

Tabell 4 Exempel på beräkning enligt IEEC 1584 med olika kortslutningsströmmar och olika arbetsavstånd med 30 mm mellan faserna

Ett exempel på där avståndet mellan ledare ökats till 60 mm

5	200	300	10 (100)	1,452 (E_{VCB})	338	3,0
				1,617 (E_{HCB})	521	2,8
				0,884 (E_{VCBB})	377	3,4
			10 (200)	1,292 (E_{VOA})	380	2,3
				3,572 (E_{HOA})	519	2,0
		450	10 (100)	0,76 (E_{VCB})	338	
				1,523 (E_{HCB})	521	
				0,872 (E_{VCBB})	377	
			10 (200)	0,676 (E_{VOA})	380	
				1,595 (E_{HOA})	519	

Tabell 5 Exempel på beräkning enligt IEEC 1584 med olika kortslutningsströmmar och olika arbetsavstånd men med 60 mm avstånd mellan faserna

9 Andra beräkningsmodeller

I denna rapport har endast två sätt att beräkna den termiska energin beskrivits det finns naturligtvis fler. Ett vanligt sätt är att beräkna energin efter en modell där man kan visa att den maximala energin blir när lastens impedans (ljusbågens) är lika med kretsens impedans. I detta fall blir strömmen hälften av den beräknade kortslutningsströmmen och man kan utgå ifrån detta vid beräkningarna. Man utgår även ifrån att energin avtar kvadratisk med avståndet från ljusbågen. Fördelen med detta beräkningsätt är att det är enkelt och att man i de flesta fall är på den säkra sidan. Nackdelen är att man oftast överskattar energin relativt mycket, vilket leder till skydd som troligen inte krävs.

Under det senaste året har det kommit ett förslag på en förenklad modell för att utföra beräkningar i likhet med IEEE 1584. Modellen verkar lovande då antalet konstanter reducerats från cirka 40 till 4, med ett beräkningsresultat som avviker på maximalt 10%, oftast några procent. I rapporten utgår man från effektbrytare och i de kontrolberäkningar som jag utfört så får man en klart större avvikelse vid smältsäkringar. Modellen kan utvecklas med ett förenklat sätt att beräkna ljusbågsströmmen men då ökar komplexiteten men är ändå klart enklare. Beräkningarna blir enklare och skulle enkelt kunna genomföras i till exempel Excell. Någon detaljerad analys av avvikelserna från IEEE 1584 vid användning av smältsäkringar har inte genomförts av någon.

I denna rapport har endast AC för lågspänning hanterats. Det finns idag ett stort behov av modeller för DC. För närvarande finns ett flertal beräkningsmodeller för DC, men de har alla flera begränsningar. De har utvecklats för ett specifikt fall eller bygger på modellen att impedansen i ljusbågen är lika med till exempel batteriets inre impedansen. Detta ger ett enkelt överslag, men har oftast ännu större fel än vid AC. För tillfället pågår studier för att hitta bättre modeller och flera finns men de som ger ett relativt bra resultat kräver datorberäkningar.

10 Definitioner

ATPV: "Arc Thermal Protection Value", värde för termiskt skydd.

Termiskt prestandavärde mot ljusbåge (arc thermal performance value). Numeriskt värde av infallande energi som tillskrivs en produkt som beskriver dess termiska egenskaper att dämpa (reducera) ett värmeflöde som genereras av en elektrisk ljusbåge.

EBT: "Energy Breakopen Threshold", gräns för hålbildning.

Tröskelenergi för öppet genombrott, (breakopen threshold energy). Numeriskt värde för infallande energi som tillskrivs produkten (material eller kläder) som beskriver dess genombrottsegenskaper när de utsätts för värmeenergi som genereras av en elektrisk ljusbåge.

ELIM: "incident Energy LIMit" gräns för infallande energi.

Gränsvärde för termisk ljusbågsenergi (incident energy limit) numeriskt värde för infallande energi som tillskrivs en produkt (material eller kläder), under vilket värde alla produktsvar ligger under Stoll-kurvan och utan genombrott. ELIM för ett klädesplagg eller en uppsättning klädesplagg är alltid mindre än eller lika med ELIM för tyget.

APC: Ljusbågsskyddsklass (arc protection class). Kategori för skydd mot ljusbågens värme för ett material och/eller produkt som testats i enlighet med boxtestet (APC 1 eller APC 2) (Class1 eller Class 2)

VCB: Vertikala ledare i metallskåp (Vertical conductors / electrodes in a metal box/enclosure)

VCBB: Vertikala ledare med en isolerad bariär i ett metallskåp (Vertical conductors / electrodes terminated in an insulating barrier in a metal box / enclosure)

HCB: Horisontella ledare i ett metallskåp (Horizontal conductors / electrodes in a metal box/ enclosure)

VOA: Vertikala ledare utan omslutning (Vertical conductors / electrodes in open air)

HOA: Horisontala ledare utan omslutning (Horizontal conductors / electrodes in open air)

11 Referenslista

SS-EN 61482-2, utg 1:2020, Kläder för skydd mot termiska risker orsakade av ljusbågar - Del 2: Fordringar

SS-EN IEC 61482-1-1, utg 2:2020, Kläder för skydd mot termiska risker orsakade av ljusbågar - Del 1-1: Provning - Metod 1: Bestämning av termiska egenskaper (ELIM, ATPV och/eller EBT) hos tyg och skyddskläder genom provning med öppen ljusbåge

SS-EN 61482-1-2, utg 2:2015, Kläder för skydd mot termiska risker orsakade av ljusbågar - Del 1-2: Provning - Metod 2: Bestämning av skyddsklass för tyg och klädesplagg genom provning med riktad ljusbåge

SS-EN IEC 62819, utg 1:2023, Ögon-, ansikts-, och huvudskydd mot risker orsakade av ljusbågar - Funktionsfordringar och testmetoder

NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace (www.nfpa.org)

IEEE 1584-2018, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations

DUGV 203-077, Thermal hazards due to electric fault arcing, Guide for the selecting personal protective equipment

Factors Affecting Arc Flash Hazard (D Clark and J Philipps)

Arc flash hazard incident energy calculations, a historical perspective and comparative study of the standards IEEE 1582 and NFPA 70E (R F Ammerman, P.K. Sen, J P Nelson)

A Basic Assessment of Arc Flash in Low Voltage AC (G Parise and A Scarpino)

BERÄKNING AV HÄNDELSEENERGIER FÖR ELNÄTSANLÄGGNINGAR

Rapporten beskriver hur den termiska ljusbågsenergin vid användande av smältsäkringar kan beräknas. Två beräkningsmodeller beskrivs IEEE 1584 och DUGV 203-077. Vid val av PPE används NFPA 70E tillsammans med IEEE 1584. Metoderna har olika för och nackdelar. IEEE 1584 är komplicerad men exakt och DUGV 203-077 är enkel men oexakt. Syftet med beräkningarna är olika och detta avspeglar sig i deras krav på exakthet. I IEEE 1584 vill man uppnå så noggrann beräkning som möjligt för att sedan använda detta som underlag för val av PPE. I DUGV 203-077 nöjer man sig med att visa att det val av PPE som man har är tillräckligt.

Beräkningar med kortslutningsströmmar mellan 1–40 kA redovisats som kan användas som underlag för val av PPE. Vid val av kategori 2 enligt NFPA 70E som standardskydd uppnås i de flesta fall ett gott skydd.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

