

Prof. Ing. Pietro Antonio SCARPINO
Docente di Impianti Elettrici
(Scuola di Ingegneria Università degli Studi di Firenze)

Studio Tecnico Associato G.M. Engineering
Piazza P. Leopoldo, 12 – 50134 Firenze
Tel. 055 483214 – Fax 055 473814
info@studiomartarelli.it – ing.scarpino@studiomartarelli.it

Valutazione del Rischio Elettrico dovuto ad archi elettrici e radiazioni (Arc Flash)

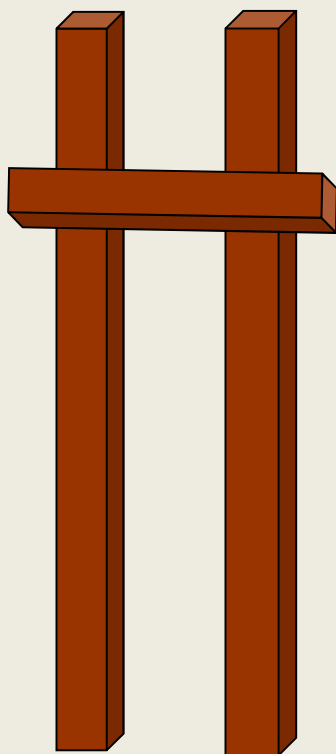


L'art. 80 del D.L. 81/2008 impone al datore di lavoro di prendere in considerazione tutti i rischi elettrici possibili ai quali i lavoratori possono essere soggetti per l'uso o manutenzione di macchinari, apparecchiature ed impianti, in particolar modo tutti i rischi derivanti da contatti elettrici diretti e indiretti, da archi elettrici e radiazioni, per lavori elettrici, ecc. ecc.

L'Arc Flash è la definizione con la quale si descrive l'evento accidentale di un arco elettrico con conseguente emissione di radiazioni elettromagnetiche e luminose.

L'evento può verificarsi per *arco metallico* (corto circuito franco) e per *arco elettrico* quando il campo elettrico supera la rigidità dielettrica del gas interposto tra parti attive trasformandolo in plasma e facendo sì che il gas interposto da dielettrico diventi conduttore; in molti casi i due eventi possono coesistere.

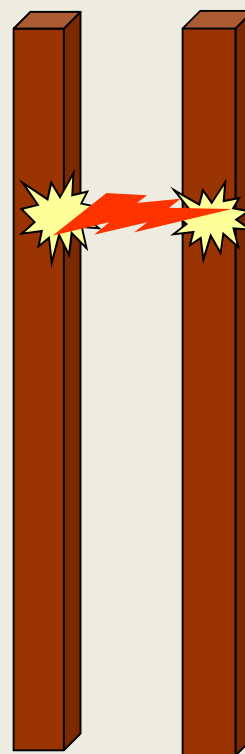
arco metallico



A

B

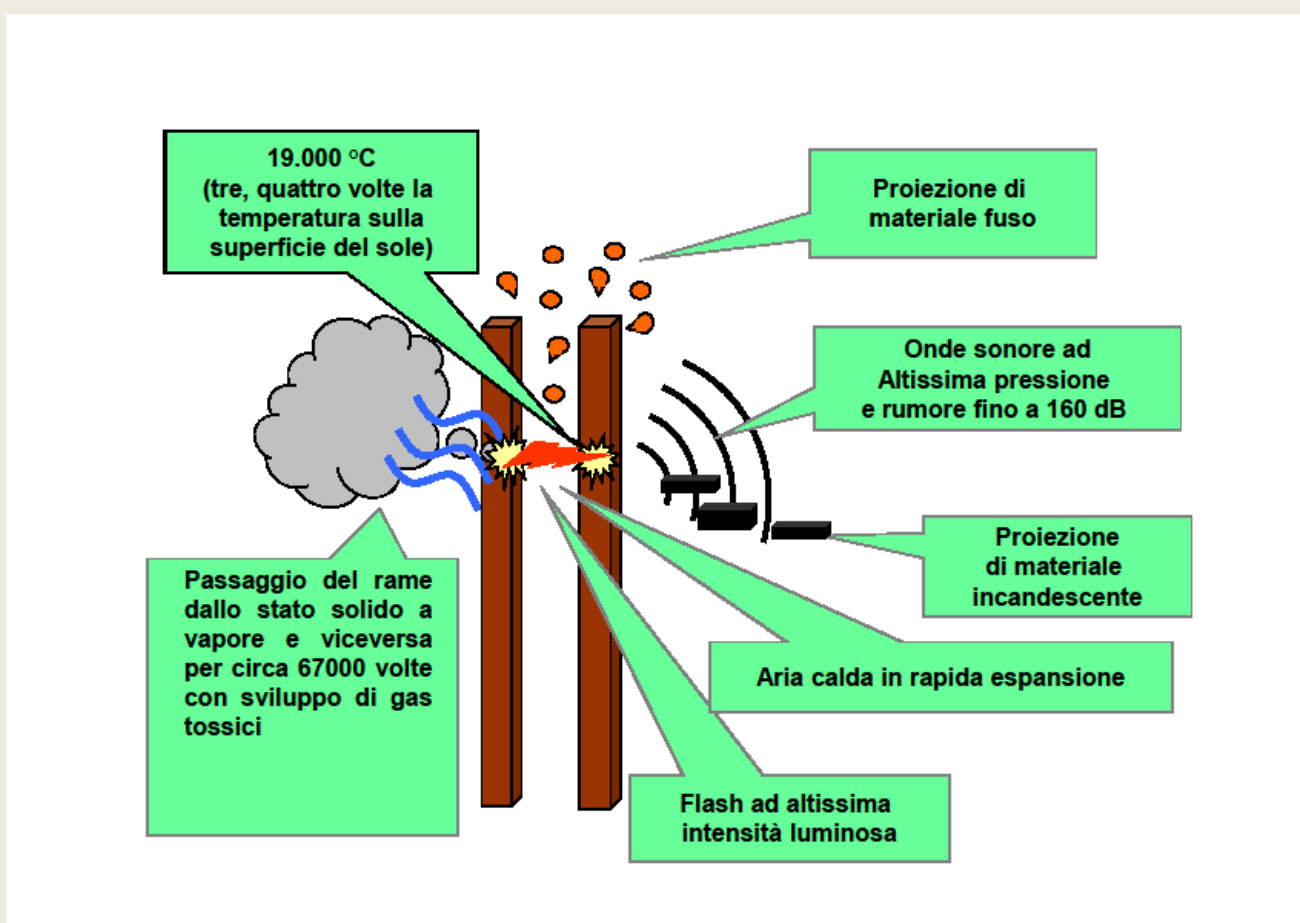
arco elettrico



A

B

In queste condizioni viene emessa una Energia Specifica Radiata elevatissima in un tempo estremamente breve fino a quando non intervengono le protezioni dell'impianto e/o del macchinario. Durante questa fase la temperatura può raggiungere valori pari a 19.000°C (quattro volte la temperatura che si ha sulla superficie solare), contemporaneamente viene espulso materiale fuso e incandescente, il metallo di cui sono costituite le parti attive in tensione passa ripetutamente dallo stato solido allo stato gassoso con emissione di gas tossici, si genera un'onda sonora con un livello di rumore di oltre 160dB e una elevata onda di pressione e per ultimo un grande flash con l'emissione di radiazioni ultraviolette.



Se il lavoratore si dovesse trovare nel campo di azione di un fenomeno di **arc flash** senza i dispositivi di protezione individuali adatti, le conseguenze sarebbero di facile comprensione.

Il rischio elettrico dovuto ad Arc Flash si verifica principalmente nelle lavorazioni elettriche per le quali vige l'obbligo di esecuzione in conformità alle Norme CEI 11-27 e CEI EN 50110-1. Questa ultima in particolare nell'allegato B al punto B.6 (ed. gennaio 2014) impone che deve essere effettuata la valutazione del rischio dovuta agli effetti dell'arco elettrico e a seguito di questa valutazione scelti gli opportuni DPI (dispositivi di protezione individuali) in caso si dovesse operare entro le aree di pericolo individuate.

NORMA ITALIANA CEI	
<i>Numero Italiano</i>	<i>Data Pubblicazione</i>
CEI 11-27	2014-01
<hr/>	
<i>Titolo</i>	
Lavori su Impianti elettrici	
<hr/>	
<i>Titolo</i>	
Works on electrical installations	

NORMA ITALIANA CEI	
<i>Norma Italiana</i>	<i>Data Pubblicazione</i>
CEI EN 50110-1	2014-01
La seguente Norma è identica a: EN 50110-1:2013-03.	
<hr/>	
<i>Titolo</i>	
Esercizio degli impianti elettrici	
Parte 1: Prescrizioni generali	
<hr/>	
<i>Titolo</i>	
Operation of electrical installations	
Part 1: General requirements	

B.6 Pericolo dell'arco elettrico

B.6.1 Generalità

Le persone che lavorano in prossimità di impianti elettrici sono esposte ai pericoli causati dall'arco elettrico. Gli archi elettrici sono un evento raro. Tuttavia, è richiesta una protezione affidabile in quanto non si può escludere che possano apparire a causa di azioni durante il lavoro. Gli archi elettrici non sono solo il risultato di un cortocircuito, ma anche di separazione di parti in tensione senza adottare misure particolari (linee, connettori per cavo, interruttori, fusibili, ecc.).

B.6.2 Pericoli

L'impatto termico di un arco elettrico dipende dall'energia elettrica incidente (capacità di cortocircuito), che determina l'energia convertita in arco (a seconda della tensione dell'arco, della corrente dell'arco e della durata dell'arco), dalle condizioni di trasmissione del flusso di calore comprese le condizioni di esposizione e la distanza dall'arco. La modalità e la violenza di trasferimento del calore non è fondamentalmente specifica per certi livelli di tensione (bassa o alta tensione).

Oltre l'impatto termico, ci sono alcuni altri rischi da valutare:

- l'onda d'urto e i frammenti che vengono rilasciati dalla esplosiva diffusione dell'arco elettrico;
- l'elevata intensità di radiazione elettromagnetica particolarmente nella gamma di raggi ultravioletti (UV) ed infrarossi (IR), ma anche nel campo della luce visibile che può portare a danni irreversibili alla pelle e agli occhi;
- shock acustico (scoppio);
- gas velenosi e particelle che sono causati da fusione e vaporizzazione di materiali all'interno dell'arco elettrico o nell'ambiente.

Idonei dispositivi di protezione individuale (DPI) riducono i rischi dell'effetto termico di archi elettrici e contribuiscono alla protezione del personale. Si noti che non vi è alcun DPI che fornisce al cento per cento la protezione contro ogni arco elettrico. Piuttosto, i rischi di un arco elettrico possono essere notevolmente ridotti e spesso essere eliminati.

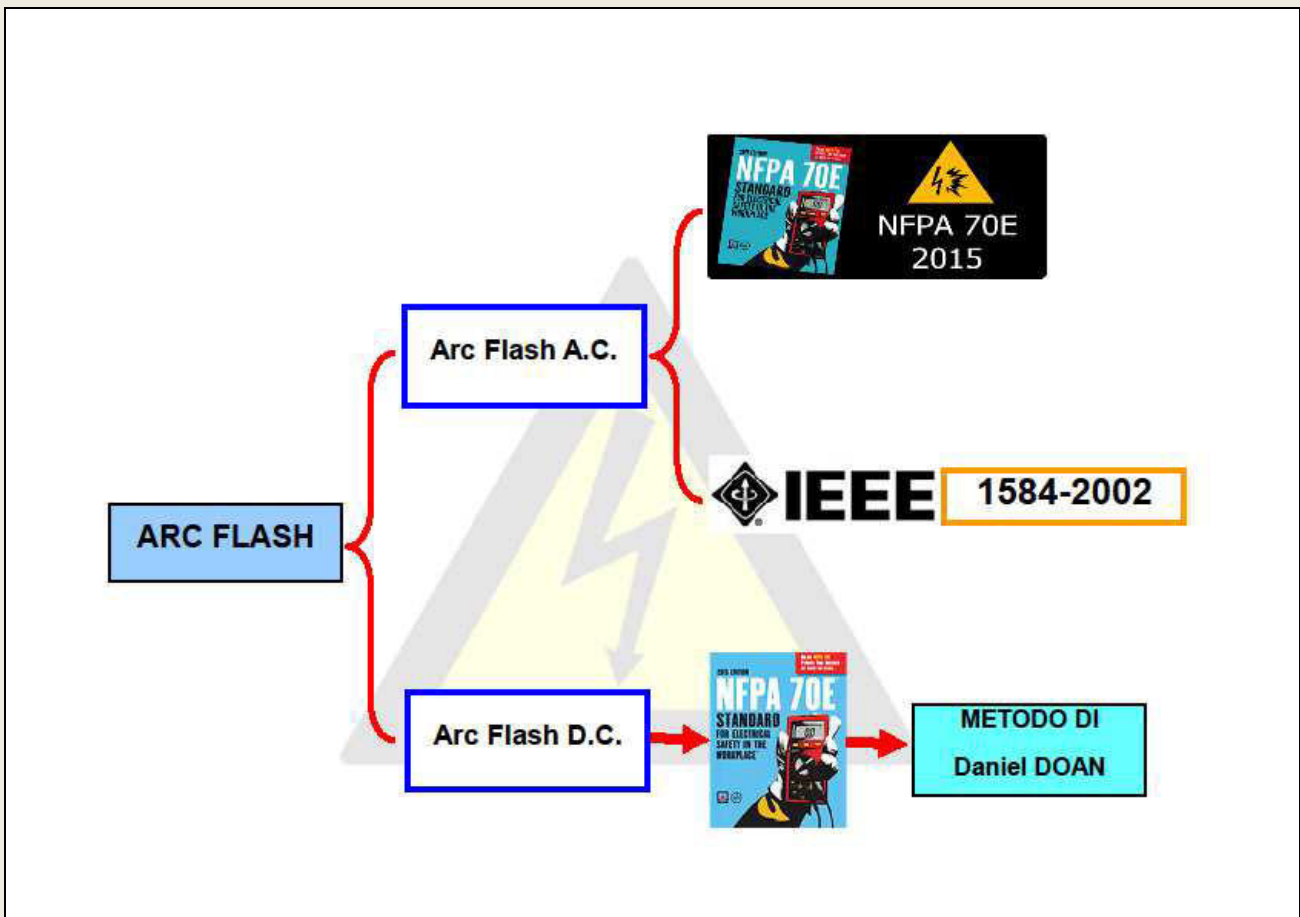
Anche nel caso di utilizzo di quadri elettrici resistenti all'arco interno e quindi conformi al Rapporto Tecnico IEC 61641 ed alle norme CEI EN 61439, dopo aver aperto gli sportelli e rimosso le protezioni gli operatori si trovano ad effettuare manovre, verifiche, misure e lavorazioni in

condizioni di totale esposizione al pericolo di arc flash, seppur per un periodo di tempo limitato.

Nonostante la legislazione in materia e le norme tecniche prevedono la valutazione del rischio elettrico dovuta agli effetti dell'arco, nessuna norma tecnica italiana ed europea definisce la procedure di valutazione analitica di tale rischio.

Attualmente le uniche norme tecniche disponibili per la valutazione del rischio elettrico dovuto ad Arc Flash sono due standard U.S.A.:

- ✓ Standard NFPA 70E della National Fire Protection Associations "Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces"
- ✓ IEEE Std 1584-2002 "Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations",



Ambedue gli Standards consentono di calcolare con formule empiriche, l'energia radiante in $[cal/cm^2]$ che si sviluppa in presenza di arc flash.

Vengono definite pertanto cinque classi di rischio a seconda della quantità di energia radiante specifica emessa in caso di arc flash come mostrato nella tabella seguente:

Valore di energia radiante calcolata in [cal/cm ²]	Categoria di Rischio	Categoria DPI
$0 < E_c \leq 1,2$	0	0
$1,2 < E_c \leq 4$	1	1
$4 < E_c \leq 8$	2	2
$8 < E_c \leq 25$	3	3
$25 < E_c \leq 40$	4	4
$E_c > 40$	Non esiste alcuna protezione	



Per poter procedere al calcolo dell'energia radiante emessa a seguito di un fenomeno di arc flash allo scopo di poterla confrontare con i valori sopra indicati, si rende necessaria l'acquisizione di grandezze elettriche che sono determinabili solo a seguito di verifica della conformazione degli impianti, valutazione della configurazione delle sorgenti di energia, misurazioni presso i quadri elettrici e analisi del coordinamento delle protezioni magnetiche.

La nostra equipe altamente specializzata nel settore degli impianti è in grado di eseguire valutazioni puntuali di ARC FLASH e di fornire le indicazioni necessarie al fine di rendere più agevoli e sicure e le lavorazioni elettriche, anche con l'adozione di provvedimenti atti a limitare il grado di rischio con conseguente riduzione del grado di severità dei DPI da impiegare.



L'Arc Thermal Performance Value (ATPV) indica la proprietà di un indumento protettivo, soggetto ad un'energia incidente radiante dovuta ad arc flash, di resistere e non provocare ustioni di 2° grado. La scelta dell'indumento passa attraverso la definizione di questo parametro.

Energia incidente [cal/cm ²]	Classificazione dell'abbigliamento	Indumenti - Resistenti alla Fiamma (FR)	Peso [g/m ²]	Livello di protezione da ustioni di 2° grado ATPV [cal/cm ²]
0-2	0	Non FR(1 strato)	150 - 240	N/A
2-5	1	Camicia e Pantaloni FR	150 - 270	5-7
5-8	2A	Indumenti intimi non FR + camicia e pantalone FR	300 - 400	8- 18
8-16	2B	Indumenti intimi non FR + camicia e pantalone FR+Tuta FR	340 - 480	16- 22
16-25	3	Indumenti intimi non FR + camicia e pantalone FR + tuta FR	540 - 680	25-50
25-40	4	Indumenti intimi non FR + camicia e pantalone FR + cappotto a doppio strato	800 - 1000	40 - >60

Pietro Antonio Scarpino, si è laureato alla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Firenze con Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica. Ha progettato diretto e collaudato impianti elettrici in media e bassa tensione, di notevole importanza, sia in campo industriale che civile e terziario. E' professore a contratto alla Scuola di Ingegneria dell'Università di Firenze dall'anno 2000, dove è titolare del corso di Impianti Elettrici alla laurea magistrale in Ingegneria Elettrica e Dell'Automazione. La sua attività di ricerca e lo studio dei sistemi elettrici di potenza in regime permanente e la valutazione del rischio elettrico dovuto ad arc flash. HA pubblicato numerosi articoli scientifici e partecipato in qualità di docente a numerosi corsi formativi e convegni. E' socio dello studio tecnico associato G.M. Engineering che si occupa di progettazione di impianti in tutti i settori.

A.C. Arc Flash Analysis: a new derivation method

Prof. Pietro Antonio Scarpino, Ph.D - Prof. Alberto Reatti, Ph.D - Prof. Francesco Grasso, Ph.D
Engineering School – University of Florence

Abstract—This paper introduces a computation procedure for the ac Arc-flash, which is based on the radiated specific energy emitted by a hot body where the arch flash is present. To make the proposed method more accurate, the paper also introduces a function, based on the Paschen curve, which takes into account the non-linear behavior of the plasma generated by the arc-flash. The results obtained by the proposed method have been validated by comparing them with those derived by using the International Standard NFPA 70E, both in terms of boundary limit and specific radiated energy. The proposed method has a practical application in the evaluation of the electric hazard after the exposure to an arc-flash. Once this hazard is evaluated, the operator can determine the safety devices working on the under voltage electric plant. Moreover, all the results have been obtained according to Italian standard CEI 11-27 ed. 2014 and European standard CEI EN 50110-1.

I. INTRODUCTION

Safety standards require the employer to evaluate all the potential hazards the employees are exposed to when working on electrical plants. Among the others, electrical hazards are those related to direct and indirect contacts and those deriving by exposure to arch-flashes. Hazards associated to the arch flash are electrical arc, high temperatures, electro-magnetic radiations, injuries caused by glowing material etc.

The arc-flash is usually generated by short-circuits and/or by electrical arcs occurring when the voltage among two conductive points is higher than the air dielectric strength: in such a case sparks are generated, the air in the spark path becomes very hot and is converted into plasma, a gas conducting electricity. Any hot-body releases energy as a black-body and the power associated to this phenomenon is described by Stefan-Boltzmann law as follows

$$\dot{Q}_i = P_i = \sigma T^4 \quad (1)$$

where $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/\text{K}^4 \text{ m}^2]$ is the Stefan-Boltzmann constant,

$$P_i = 0,567 \cdot C_a (T_e^4 - T_a^4) \cdot 10^{-11} [\text{W}/\text{cm}^2] \quad (2)$$

C_a is the absorption constant, and T_e and T_a , measured in Kelvin degrees, are the temperatures of the emitting and absorbing bodies, respectively [1].

Even if electric arcs have been studied for a long time, the physical phenomena related to them are not very clear yet and no relationship among voltage and current during an arc-flash has been elaborated up to now. We can say that the arc-flash is a phenomenon involving the physics of radial energy transportation under a magnetized and turbulent plasma.

Under such a condition, a very high specific energy is emitted in a very short time, which is the time required by switch contacts to open; this is also the time a person is exposed to the effects of an electric arc. During this time, the plasma reaches a temperature as high as 19,000 °C, which is four times the sun surface temperature), metal contact melts and suddenly moves from solid to gas and vice-versa for several times, toxic exhausts are produced, a 160dB sonic wave is generated, which induces a very high air pressure to be generated. Moreover, a light flash is produced as well, along with electro-magnetic radiations, some of which are ionizing radiations. Should a worker be within the arc flash zone without the proper PPE, consequences would be unfortunately unavoidable. Situations involving Arc-flash phenomena are contemplated by the Italian standards CEI 11-27 and CEI EN 50110-1. According to the latter standard (Annex B, paragraph B.6, 2004 edition) it is mandatory to evaluate the hazards deriving from the effects of an arc-flash. Even when insulated electric switchboard is built according to IEC 61641 and CEI EN 61439 standards, arc-flash hazards must be considered. As a matter of fact, maintenance operations must be performed by opening doors and any mechanical protection. In such situations operators, even for a limited time are under the arc-flash hazard, as shown in Fig. 1

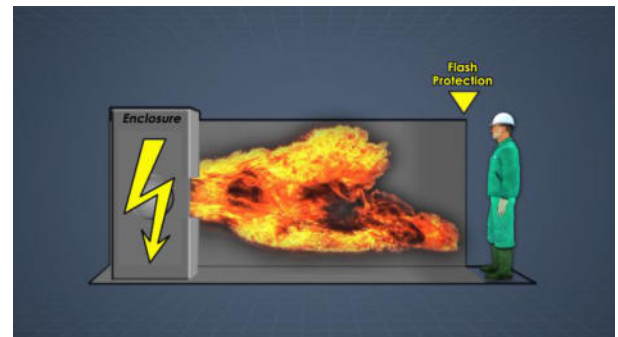


Fig. 1. Security distance at which is the radiated energy is reduced to 1.2 cal/cm².

II. EVALUATION METHODS

Since 1970 OSHA (Occupational Safety and Health Administration in the USA), which operates in the field of workplaces safety, has been concerned with hazards related to the arc-flash. Therefore, two standards have been developed to evaluate the arc-flash hazards:

- NFPA-70E “Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces”, by NFPA (National Fire Protection Associations) [2].
- IEEE 1584-2002 – IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations [3].

Both these standards provide empirical equations, which calculate the incident radiant energy E_c in $[\text{cal}/\text{cm}^2]$ delivered by an arc-flash. Even if these standards are based on different equations, and they both lead to similar results, IEEE 1584-2002 is more accurate.

Fig. 2 shows the voltage as a function of the current during a typical electrical discharge inside a gas. Arc-flash occurs when the current is close 100 of Amperes, which corresponds to the J-K curve slightly varying with current. As shown in Fig. 2, this curve is called ‘‘Thermal-arc’’.

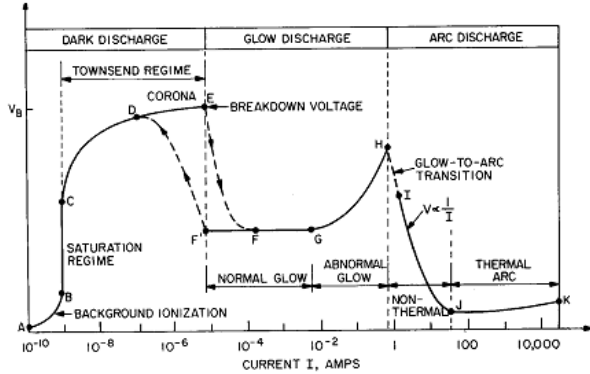


Fig. 2. Voltage as a function of the current during a typical electrical discharge inside gas.

NFPA-70E standard defines five hazard classes as shown in Table I. Hazard evaluation aims at calculating the radiant energy and, then, determining the arc-flash hazard class, and, finally the appropriate device type.

TABLE I : ARC-FLASH HAZARD EVALUATION LOOK-UP TABLE.

Radiant Energy E_c [cal/cm ²]	Hazard Class	Protecting Device Type
$0 < E_c \leq 1,2$	0	0
$1,2 < E_c \leq 4$	1	1
$4 < E_c \leq 8$	2	2
$8 < E_c \leq 25$	3	3
$25 < E_c \leq 40$	4	4
$E_c > 40$	No suitable protections against Arc-flash	

III. NEW CALCULATION METHOD

The proposed method is based in the calculation of the radiant energy emitted by a hot part of a device where an arc-flash occurs. Nonlinear coefficient considering the effects of the arc-flash is considered in the proposed method. This coefficient faithfully represents the JK (Thermal arc) curve as shown in the following Fig. 2.

The USA standards presume empirical relations in order to express the radiated energy. The proposed method takes into account the physical expression of the specific radiated energy during the arc, considering the arc current in relation to the peak value of the short circuit current, through an empiric coefficient related to the apparent power.

The specific infinitesimal radiated energy delivered at a certain distance (D) in the air in case of arc-flash has a spatial spherical distribution given by:

$$dE_s = \frac{P_{Arc} dt}{4\pi D^2} \quad [\text{J}/\text{m}^2] \quad (3)$$

If the arc model is resistive, the current and voltage phasors have the same phase and, therefore, the arc active power is

$$P_{Arc} = \sqrt{3} V_{Arc} I_{Arc} \quad [\text{W}] \quad (4)$$

The maximum emitted power occurs when the arc voltage is $V_{Arc} = 0.5 V_n$, that is, 50% of the electrical system nominal voltage. Here the arc current is a function of the three-phase short circuit maximum value, as given below

$$I_{Arc} = \lambda^2 I_{K, peak} \quad (5)$$

where

$$I_{K, peak} = \sqrt{2} K I_K, \quad (6)$$

I_K is the steady state short circuit in the place where the arc occurs, and K , which is the ratio among R/X , is given by

$$K \approx 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{3R}{X}}. \quad (7)$$

An arc-flash is a nearly resistive electric phenomenon, then

$X \rightarrow 0$, therefore $e^{\frac{3R}{X}} \rightarrow 0$ and, finally, $K \approx 1$.

Combination of (5) and (6), gives

$$\lambda^2 = \frac{I_{Arc}}{\sqrt{2} \cdot I_k}. \quad (8)$$

Here λ^2 takes into account the nonlinear behavior of the plasma, which is generated by the arc-flash. Substitution of (8) into (4) results in

$$P_{Arc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \lambda^2 V_n I_k, \quad (9)$$

which, substituted into (3) gives

$$dE_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\lambda^2 V_n I_k}{4\pi D^2} dt \quad [\text{J}/\text{m}^2]. \quad (10)$$

If Joules are converted into calories and meters into centimeters (10), we may have:

$$dE_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 0,239 \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{\lambda^2 V_n I_k}{\left(\frac{D}{100}\right)^2} dt \quad [\text{cal}/\text{cm}^2], \quad (11)$$

which can be compared to the values in Table I.

If the specific radiated energy is integrated among 0 and a generic distance D , and time t_A , which is the opening time of the electric protection (magnetic switch, AFDD, light sensor relais etc.), we have:

$$\int_0^{E_{s,D}} dE_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 0,239 \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\lambda^2 V_n I_k}{\left(\frac{D}{100}\right)^2} \int_0^{t_A} dt, \quad (12)$$

which simplifies into

$$\int_0^{E_{s,D}} dE_s = 233,05 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{V_n I_k t_a}{D^2} \int_0^{t_a} dt, \quad (13)$$

and, finally

$$E_{s,D} = 233,05 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{V_n I_k}{D^2} \cdot t_a \quad [\text{cal/cm}^2] \quad (14)$$

If we now assume $D = D_C$, where D_C is the border distance, (14) results in $E_{s,D_C} = 1,2$ [cal/cm²]. By assuming $\lambda = \lambda_c$, we have

$$D_c = 13,936 \cdot \lambda_c \cdot \sqrt{V_n I_k t_a} \quad [\text{cm}] \quad (15)$$

according to NFPA 70E standard, the border distance is expressed as

$$D_{c-NFPA70E} = \sqrt{2,65 \cdot \sqrt{3} V_n I_k t_a} \cdot 30,48 \quad [\text{cm}] \quad (16)$$

Combination of (15) and (16) results in $D_c = D_{c-NFPA70E}$, which gives:

$$\lambda_c = 4,68 \quad (17)$$

Substitution of this into (15) gives

$$D_c = 65,22 \cdot \sqrt{V_n I_k t_a} \quad [\text{cm}] \quad (18)$$

which expresses the border distance: at a distance larger than that given by (18) the radiated energy reduces below the hazard level which is 1,2 [cal/cm²].

The expression of λ^2 can be experimentally derived as a function of the nominal apparent power of the transformer feeding the plant as follows

$$\lambda^2 = \begin{cases} \frac{14783}{A_n} + 1.3 \cdot 10^{-5} A_n & 50 \text{ kVA} \leq A_n \leq 1000 \text{ kVA} \\ \frac{14783}{A_n} + 1.0 \cdot 10^{-5} A_n & A_n = 1250 \text{ kVA} \\ \frac{14783}{A_n} + 8.5 \cdot 10^{-6} A_n & A_n = 1600 \text{ kVA} \\ \frac{14783}{A_n} + 7.0 \cdot 10^{-6} A_n & A_n = 2000 \text{ kVA} \\ \frac{14783}{A_n} + 6.0 \cdot 10^{-6} A_n & A_n = 2500 \text{ kVA} \end{cases} \quad (19)$$

As shown in Fig. 3, the plots perfectly fit the Paschen function in the thermal arc zone.

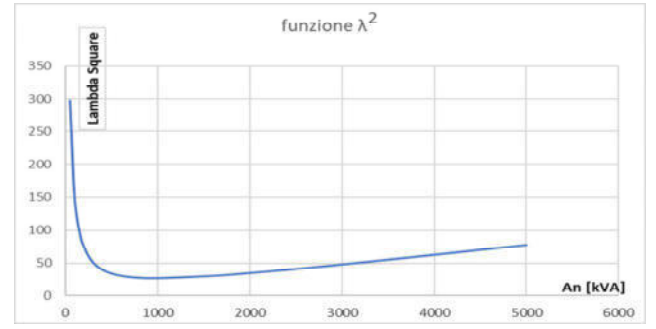


Fig. 3. Coefficient λ^2 as a function of the transformer apparent power.

IV. RESULT VALIDATION AND COMPARISON WITH NFPA 70E STANDARDS.

As examples, computations of arc-flash occurring in a MV/lv sub-station have been considered at: different MV/lv transformer rated powers; a transformer configuration $\Delta y n 11$, transformer short circuit voltage 6%; a transformer voltage ratio 15000 V/ 400 V, different distances from the place the arc-flash occurs; the time the switch open has been assumed to be as long as $t_A = 60$ ms. In the following tables the calculations performed by the proposed method are compared to the NFPA 70E. The critical distances calculated with the proposed method are nearly the same as those calculated using NFPA 70E standards and this validates the proposed method.

TABLE I: ARC-FLASH HAZARD EVALUATION FOR A $A_N = 400$ KVA TRANSFORMER WITH A 400 V.

D [cm]	$E_{s,NFPA70E}$ [cal/cm ²]	$E_{s,D}$ [cal/cm ²]	Hazard Class
50	0.89	0.84	0
30	2.43	2.33	1
20	5.37	5.25	2
15	9.44	9.34	3
10	20.90	21.01	3
10	20.90	21.01	3

$$D_c = 31.34 [\text{cm}]; D_{c-NFPA70E} = 31.38 [\text{cm}]$$

TABLE III: ARC-FLASH HAZARD EVALUATION FOR A $A_N = 630$ KVA TRANSFORMER WITH A 400 V.

D [cm]	$E_{s,NFPA70E}$ [cal/cm ²]	$E_{s,D}$ [cal/cm ²]	Hazard Class
50	1.06	0.97	1
30	2.87	2.70	1
20	6.36	6.07	2
15	11.17	10.78	3
10	24.73	24.27	3

$$D_c = 39.34 [\text{cm}]; D_{c-NFPA70E} = 39.38 [\text{cm}]$$

TABLE IV: ARC-FLASH HAZARD EVALUATION FOR A $A_N = 800$ KVA TRANSFORMER WITH A 400 V.

D [cm]	$E_{s,NFPA70E}$ [cal/cm ²]	$E_{s,D}$ [cal/cm ²]	Hazard Class
50	1.23	1.15	0
30	3.36	3.21	1
20	7.44	7.21	2
15	13.06	12.82	3
10	28.91	28.85	4

$$D_c = 44.33 [\text{cm}]; D_{c-NFPA70E} = 44.38 [\text{cm}]$$

TABLE V : ARC-FLASH HAZARD EVALUATION FOR A $A_N=1600$ KVA TRANSFORMER WITH A 400 V.

D [cm]	$E_{s,NFPA70E}$ [cal./cm ²]	$E_{s,D}$ [cal./cm ²]	Hazard Class
50	2.74	2.70	1
30	7.45	7.49	2
20	16.49	16.86	3
15	28.97	29.97	4

$$D_e = 62.69 \text{ [cm]}; D_{e-NFPA70E} = 62.76 \text{ [cm]}$$

Arc flash effect can be limited by using several techniques as follows:

- The arc current I_K is reduced if limiting switch are utilized;
- Time exposition to the arc is reduced reducing the set-up time of magnetic, short-circuit, protection of the switch. This can be done in a plant if a logic selectivity among magnetic protections of the switches is achieved.
- Arch-flash relays, driven by lighting sensors and able to command switch contact opening even before the magnetic protection may do it. These devices are available in the US market but are difficult to be purchased in Italy [4] and [5].
- Accurate preventing maintenance checks and tests are very useful in preventing arc-flashes to occur. Thermography represents a very useful tool in the search of hot places inside an electrical plant. These hot-spots are able to reveal the presence of heavily unbalanced load, overheating inside electric switchboard etc. Once the thermography detected problem like these, appropriate modifications and/or set-up to the plant, preventing arch-flashes, can be performed.
- switchboard etc. Once the thermography detected problem like these, appropriate modifications and/or set-up to the plant, preventing arch-flashes, can be performed.

CONCLUSION

A new method based on the arc-flash energy has been proposed along with a new function here defined, which depends on the nominal apparent power of the MV/lv transformer supplying the electric plant.

A new expression for λ^2 as a function of the nominal power of the MV/lv transformer feeding the plant has been introduced.

This function very accurately reproduces the Paschen curve describing an electric discharge inside a gas when the current values make this discharge occur inside the "Thermal Arc" zone; this is the case corresponding to the arch-flash phenomenon.

The method is useful for professional engineers because it allows an accurate evaluation of an arc-flash radiated energy starting from well-known electrical plants parameter values, such as nominal voltage the plant is operated and three-phase short circuit current in the place the arc-flash may occur.

REFERENCES

- C. J. Spezia. "A Survey of Arc-flash Computation Methods and Mitigation Strategiesn". Journal of Industrial Technology. Volume 26. number 2. April 2010 through June 2010.
- NFPA 70E-2012. "Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces". Copyright 2012. National Fire Protection Association.
- IEEE 1584-2002 – IEEE Guide for Performing Arc-flash Hazard Calculation". Istitute of Electrical and Electronics Engineering. New York, NY.
- C. Inshaw and R. A. Wilsonl. "Arc-flash Hazard Analysis and Mitigation. Presented to Western Protective Relay Conference Spokane, WA. October 20th. 2004.
- H. Picard (Eaton), J. Verstraten (Dow) and R. Luchtemberg (Nam/Shell). "Pratical Approaches to Mitigating Arc-flash Exposure in Europe". Copyright Material PCIC Europe Paper No. IS-20.

Valutazione del rischio elettrico dovuto ad Arc Flash in D.C.

Dott. Ing. Pietro Antonio Scarpino, Ph.D
Presidente AEIT sezione Toscana e Umbria
Scuola di Ingegneria Università di Firenze

Abstract— L'articolo espone i metodi di valutazione del rischio elettrico dovuto ai fenomeni di Arc Flash nei sistemi elettrici alimentati in corrente continua (D.C.) quali ups, soccorritori statici, locali batterie, impianti fotovoltaici. In relazione a questi ultimi, solo nell'anno 2012 si sono verificati in Italia 786 incendi tra le cui cause risultano spesso fenomeni dovuti all'arco elettrico. Nel 2012 l'NFPA 70E ha incluso, all'interno dello standard, una serie di tabelle utile per l'analisi dell'Arc Flash nei sistemi elettrici in corrente continua.

I. INTRODUZIONE

Nell'ultimo decennio, abbiamo assistito nel nostro Paese, ad una notevole implementazione di impianti fotovoltaici di piccola e grande potenza anche fino a qualche decina di MW. Tali sistemi, com'è noto, utilizzano pannelli al silicio che trasformano l'energia radiata dal sole in energia elettrica in corrente continua per poi essere convertita, tramite gli inverter, in corrente alternata.

I tipi di archi elettrici che si possono verificare in un impianto fotovoltaico sono fondamentalmente tre come evidenziato in Fig. 1 e sintetizzabili come:

- archi elettrici di tipo serie (S);
- archi elettrici di tipo parallelo (P);
- archi elettrici verso terra (G)

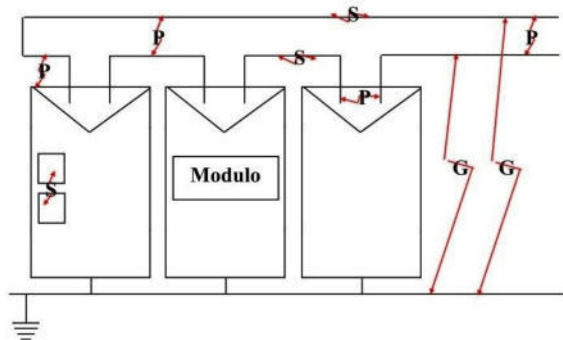


Fig. 1: Tipi di archi elettrici su pannelli fotovoltaici.

Tutti e tre i tipi di arco elettrico descritti, sono a tutti gli effetti degli Arc Flash di piccola o di modesta entità, che si possono verificare tra i connettori di pannello o di stringa (arco elettrico di tipo serie S), per danneggiamento dell'isolamento del cavo (arco di tipo S), tra i morsetti dei quadri di stringa (String Box)

o tra cavi elettrici a diversa polarità (classificabili come archi elettrici di tipo parallelo P) o da uno di questi conduttori verso massa, connessa a terra e pertanto classificabile come arco elettrico verso terra G.

Negli impianti fotovoltaici i fenomeni di Arc Flash sono quindi altamente probabili e dovuti a svariate cause, come ad esempio l'allentamento dei morsetti di collegamento del cavo principale di stringa nelle String Box (quadri di stringa), cortocircuito sul lato D.C., fenomeni di sovratemperatura per esposizione prolungata alle radiazioni solare, difetto dei pannelli, uso di materiale di scarsa qualità, ecc. ecc. .

Una volta che l'arco elettrico si è instaurato non è facile interromperlo visto che la corrente d'arco non attraversa l'asse dei tempi, e pertanto il rischio di incendio è altamente probabile, con gravi conseguenze sia per gli eventuali operatori sia, se l'impianto è installato sul tetto dell'edificio, per l'edificio stesso.

Il fenomeno dell'arco elettrico si può verificare:

- durante il regime di normale dell'impianto;
- in caso di guasto in una sezione di impianto, riconducibile ad una sovratensione o ad un cortocircuito.

Sono proprio quest'ultimi, i casi in cui gli archi elettrici possono costituire un'insidiosa causa di rischio elettrico per le persone (elettrocuzione, ustioni, danni alla pelle e agli occhi dovuti all'emissione di raggi UV), ma anche per le cose (impianti o immobili) perché, contestualmente alla scarica luminosa, quando si verifica un arco elettrico si ha anche un forte sviluppo di calore, emissione di gas, vapori tossici e proiezione di particelle incandescenti che possono dare origine ad un incendio o, in particolari condizioni, causare esplosioni.

E' possibile fare un paragone fra le due principali caratteristiche delle scariche che possono interessare gli impianti FV e quelli alimentati dalla rete, e sono: il tempo di intervento delle protezioni e l'intensità della corrente d'arco. Entrambe queste grandezze sono direttamente proporzionali all'energia che si libera durante una scarica.

Generalmente per gli impianti FV la corrente d'arco, conseguente ad un cortocircuito, risulta essere inferiore a quella riscontrabile negli impianti alimentati dalla rete; per contro, però, è più difficile estinguere un arco in corrente continua, quindi il tempo di intervento delle protezioni è superiore.

Anche per gli UPS, per i soccorritori statici e per i veicoli elettrici e ibridi si possono verificare fenomeni di Arc Flash D.C.. Per tutti questi sistemi le operazioni di misura e manutentive su parti elettriche sotto tensione, in corrente

continua, devono essere eseguite con l'uso di procedure mirate e l'utilizzo di dispositivi di protezione individuali e collettivi (DPI e DPC) specifici, in funzione dell'energia radiata dall'Arc Flash.

Un operatore investito dall'arco elettrico in corrente continua, risulta essere sottoposto a temperature elevatissime (si possono raggiungere temperature fino a 35000 °C), onde ad alta pressione, espulsione di materiale fuso a velocità di circa 1600 km/h con l'alta probabilità di perforare il corpo umano e qualsiasi cosa si trovi nelle vicinanze e la conseguente formazione di incendi se il materiale colpito è combustibile. Le conseguenze sugli operatori che riescono a sopravvivere a questo fenomeno sono: gravi ustioni, perdita dell'udito, cecità, gravi menomazioni fisiche.

II. METODI DI VALUTAZIONE

Nel 2012 l'NFPA 70E ha incluso, all'interno dello standard, delle tabelle per la scelta dei dispositivi di protezione individuali in funzione dei ranges di tensione per i lavori elettrici col limite di tensione in corrente continua di 600 V, per l'analisi dell'Arc Flash nei sistemi elettrici in corrente continua. I calcoli si riferiscono alla durata dell'arco di 2 secondi ed alla distanza di lavoro 45,72 cm (18"). Lo standard indica che il tempo massimo di esposizione all'arco sia pari a 2 secondi oltre il quale si ritiene che le protezioni magnetiche, addette all'eliminazione delle correnti di cortocircuito, siano intervenute. Tale tempo di esposizione è sicuramente elevato per le valutazioni di rischio da Arc Flash ma sicuramente definisce un limite superiore oltre il quale non si può andare. Per una valutazione di rischio accurata, si dovranno considerare i tempi veri di intervento delle protezioni magnetiche addette all'eliminazione del guasto. Lo standard NFPA 70E ha fornito alcune indicazioni per la valutazione dell'Arc Flash D.C. focalizzando principalmente l'attenzione sulla manutenzione delle batterie stazionarie fino a tensioni di 600 V. La scala di riferimento delle energie radianti in caso di Arc Flash D.C. rimane comunque quella ormai nota e cioè:

TABELLA I: TABELLA PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO ARC FLASH

Valore dell'Energia radiante E_c calcolata in $[cal/cm^2]$	Categoria di Rischio	Categoria DPI
$0 < E_c \leq 1,2$	0	0
$1,2 < E_c \leq 4$	1	1
$4 < E_c \leq 8$	2	2
$8 < E_c \leq 25$	3	3
$25 < E_c \leq 40$	4	4
$E_c > 40$	Non esistono protezioni da Arc Flash	

Lo scopo della valutazione è quello di calcolare l'energia radiante emessa dall'Arc Flash e di confrontarla con la Tabella I, la quale fornisce la categoria di rischio e la categoria di DPI (Dispositivi di Protezione Individuali) associati.

Lo standard IEEE 1584, anche se quello maggiormente utilizzato per la valutazione dell'Arc Flash in corrente alternata, in corrente continua non fornisce alcuna indicazione.

I metodi oggi conosciuti per la valutazione dell'Arc Flash in corrente continua sono fondamentalmente due:

- Metodo della massima potenza, dovuto a Daniel Doan (2007), il quale presuppone che la massima potenza per un arc flash si ha quando la tensione d'arco si riduce al 50% della tensione di alimentazione;
- Metodo di Ammerman (2009) di tipo empirico che determina l'energia radiata attraverso il calcolo della resistenza d'arco e della corrente d'arco.

Comunque sia, i due metodi riconoscono che la distribuzione dell'energia specifica radiata in aria è di tipo sferica, la cui espressione può essere calcolata attraverso la seguente relazione:

$$E_S = \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) \quad [J/cm^2] \quad (1)$$

dove P_{arc} è la massima potenza sprigionata dall'arco ed espressa in [W], t_{exp} è il tempo di esposizione all'arco (tempo di durata dell'arco) espresso in [s] e D è la distanza di lavoro cioè la distanza a cui si trova l'operatore dal punto attivo in cui si verifica l'arco espressa in [cm]. [1][2]

Esprimendo la P_{arc} in [kW] ed effettuando la conversione da Joule a calorie ($1[J]=0,239 [cal]$), la (1) diventa:

$$E_S = \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) (0,239 \cdot 1000) \quad [cal/cm^2] \quad (2)$$

$$E_S = 19,02 \cdot \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{D^2} \right)$$

I risultati ottenuti dalla (2) vanno confrontati con gli intervalli di valori della Tabella I per la valutazione del rischio dovuto ad Arc Flash.

L'espressione (2) rappresenta l'energia specifica radiata in aria libera ed espressa in $[cal/cm^2]$.

L'energia specifica radiata all'interno di una struttura chiusa, come potrebbe essere un quadro elettrico, un inverter, una String Box, una cassetta ecc., può essere calcolata dall'espressione precedente semplicemente moltiplicando la (2) per il fattore 3, per indicare che in una struttura chiusa almeno tre lati sono vincolati e quindi si ha:

$$E_{S,calc.} = 3 \cdot \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) (0,239 \cdot 1000) \quad [cal/cm^2] \quad (3)$$

$$E_{S,calc.} = 57,08 \cdot \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{D^2} \right)$$

III. METODO DI DOAN E METODO DI AMMERMANN.

Il sistema al quale dobbiamo fare riferimento è rappresentato dallo schema circuitale equivalente riportato in Figura 2, dove V_{system} rappresenta la tensione a vuoto equivalente vista dal nodo di guasto (punto attivo dove si verifica l'arco), R_{system} è la resistenza equivalente in corrente continua vista dal nodo di guasto e calcolata secondo il Principio di Thevenin ed include cavi connettori e celle, mentre R_{arc} esprime la resistenza d'arco. [1]

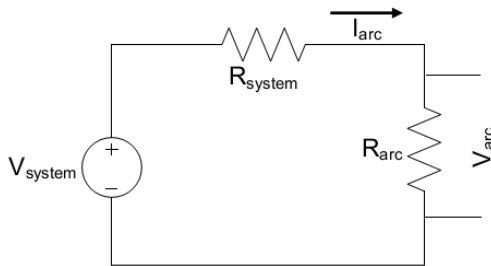


Fig. 2: Modello circuitale equivalente per il calcolo della corrente d'arco.

Poiché la potenza nei sistemi in corrente continua è data dalla semplice espressione:

$$P = V_{d.c.} \cdot I_{d.c.} \quad (4)$$

In condizioni d'arco possiamo scrivere:

$$P_{arc} = V_{arc} \cdot I_{arc} = R_{arc} \cdot I_{arc}^2 \quad (5)$$

E quindi in termini di energia:

$$E_{arc} = R_{arc} \cdot I_{arc}^2 \cdot t_{exp} \quad [J] \quad (6)$$

la cui energia specifica radiata in aria risulta:

$$E_s = \frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \quad [J/cm^2] \quad (7)$$

Lo standard NFPA 70E Annesso D, propone un metodo per calcolare I_{arc} in relazione alla corrente di cortocircuito I_{sc} :

$$I_{arc} = 0,5 \cdot I_{SC} \quad (8)$$

Sostituendo le espressioni trovate, ed esprimendo l'energia specifica radiata in cal/cm^2 si ha:

$$E_{s,calc} = 0,239 \cdot I_{arc} \cdot V_{system} \cdot \frac{t_{exp}}{4\pi D^2} = 0,02 \cdot I_{arc} \cdot V_{system} \cdot \frac{t_{exp}}{D^2} \quad [cal/cm^2] \quad (9)$$

Il Metodo di Ammerman, sempre mantenendo le validità del circuito di figura precedente, ci consente di calcolare la resistenza d'arco e la corrente d'arco attraverso le relazioni:

$$R_{arc} = \frac{20 + 0,534 \cdot l_g}{I_{arc}^{0,88}} \quad (10)$$

$$I_{arc} = \frac{V_{system}}{R_{system} + R_{arc}}$$

dove l_g è la distanza del gap in mm che varia da 12,7 mm a 558,8 mm.

Una volta determinate la resistenza d'arco e la corrente d'arco mediante le relazioni espresse nella (10), l'energia specifica radiata è calcolata attraverso la (9).

Esempio di calcolo.

A titolo esemplificativo, valutiamo il rischio elettrico da Arc Flash su un UPS le cui caratteristiche sono evidenziate in Tabella II:

TABELLA II: DATI CARATTERISTICI DI UN UPS CON BATTERIE AL PIOMBO

Grandezze elettriche ed elementi costitutivi	UPS, realizzato con batterie stazionarie al piombo
Numero di dischi	35
Corrente di cortocircuito	31 kA
Numero di celle	240
Tensione a circuito aperto	2,10 V
Resistenza interna Batteria	68 $\mu\Omega$

Consideriamo come distanza di prossimità D_v dal nodo attivo pari 30 cm (CEI 11-27 – Lavoro elettrico in prossimità) e un tempo di esposizione di 2 s.

Applicando le relazioni (8) e (9) si ha:

$$I_{arc} = 15,5 \text{ kA}$$

$$E_{s,calc} = 0,02 \cdot 15.500 \cdot 240 \cdot 2,10 \cdot \frac{2}{30^2} = 347,2 \quad [cal/cm^2]$$

Confrontando questo valore con la Tabella I, si nota che non esiste alcuna protezione ad Arc Flash D.C. Un tempo di esposizione dell'ordine dei secondi risulta fatale per l'operatore. Riducendo il tempo di esposizione a 0,1 [s], a parità di distanza, l'energia specifica radiata si riduce a 17,36 $[cal/cm^2]$ riportando la categoria di rischio a 3. Adoperando relè di protezione da Arc Flash con tempi di interruzione dell'alimentazione e quindi del tempo di apertura della protezione pari a 15 ms si hanno valori di energia radiata di 1,72 $[cal/cm^2]$ con categoria di rischio e di DPI pari a 1 del tutto accettabile.

IV. VALUTAZIONE DEL RISCHIO ELETTRICO DOVUTO AD ARC FLASH NEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI: ESEMPIO APPLICATIVO

Per gli impianti fotovoltaici lo standard NFPA 70E Annesso D, propone un metodo per calcolare la corrente d'arco I_{arc} in relazione alla corrente di cortocircuito standard

del pannello fotovoltaico I_{sc} fornita dal costruttore attraverso la relazione:

$$I_{arc} = I_{cc} = 1,25 \cdot I_{sc} \quad (11)$$

Tale relazione è la stessa di quella proposta nella Norma CEI 82-25.

Poiché vi è correlazione diretta tra potenza e corrente, possiamo scrivere:

$$P_{arc} = 1,25 \cdot P_{n,max} \quad (12)$$

Per la valutazione dell'Arc Flash di impianti fotovoltaici è necessario quindi calcolare le correnti di cortocircuito nei vari punti di valutazione e da queste le potenze d'arco.

Note le potenze d'arco P_{arc} , in tutti i punti di valutazione, e applicando ripetutamente la (9), si determinano i valori delle energie specifiche radiate nei punti di verifica.

La Figura 3 rappresenta un sotto campo fotovoltaico di circa 1 MW di un impianto FV di produzione di energia elettrica della potenza complessiva di picco di circa 10 MW. Il sotto campo è costituito da 3 inverter da 330 kW, da pannelli fotovoltaici tipo Canadian Solar CS6P 240W con $I_{sc}=8,59A$ per un totale di 4160 pannelli fotovoltaici e di un trasformatore elevatore della potenza apparente nominale di 1000 kVA e rapporto di trasformazione 15000/320.

Ogni inverter è costituito da 6 cassette della potenza di 55 kW per una potenza totale di 330 kW e ogni String Box connessa ad ogni cassetto dell'inverter è costituita da 12 stringe di pannelli fotovoltaici.

Consideriamo le condizioni peggiori per il calcolo delle correnti di guasto verso terra e cioè:

- tutte le String Box complete di 12 stringhe, ogni stringa è composta da 20 pannelli;
- tutti i cassette di ogni inverter alimentati (6 cassette per ogni inverter ognuno di 55kW);
- N. 3 inverter collegati al quadro di parallelo inverter per una potenza complessiva di $3 \times 330kW = 990 kW$.

Calcoliamo le correnti di guasto verso terra nei casi indicati con 1, 2, 3, 4 e 5 nello schema di Figura 3.

Caso 1: guasto verso terra sul cavo d.c. di stringa.

Un cortocircuito su un cavo di collegamento stringa di una generica String Box, viene alimentato simultaneamente a monte dalla stringa in questione ($I_{cc1} = 1,25 \times I_{sc}$) e a valle da tutte le (n-1) stringhe, con n numero massimo di stringhe collegate alla String Box in considerazione:

$$I_{CC1} = 1,25 \cdot I_{SC} = 10,74 A$$

$$I_{CC1(n-1)} = (n-1) \cdot 1,25 \cdot I_{SC} = 11 \cdot 1,25 \cdot 8,59 = 118,11 A$$

$$I_{CC1,Tot.} = I_{CC1} + I_{CC(n-1)} = 128,88 A$$

Per quanto riguarda la potenza d'arco possiamo scrivere:

$$P_{arc,1} = 1,25 \cdot P_{n,max-totale} = 1,25 \cdot 4,80 = 6,00 kW$$

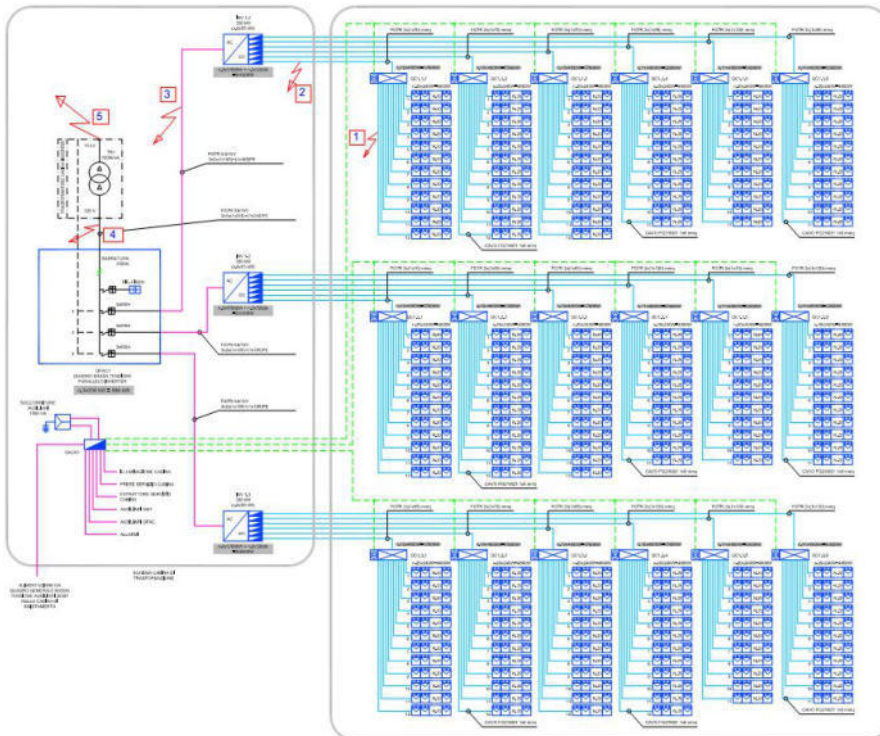


Fig.3: Punti di valutazione Arc Flash Sottocampo FV 1MW

Caso 2: guasto verso terra sul cavo d.c. di collegamento tra Stringbox e inverter.

Un cortocircuito su un cavo di collegamento tra String Box e inverter, viene alimentato simultaneamente a monte dallo String Box in questione (I_{CC2}) e a valle da tutti gli (m-1) String Box collegati all'inverter con m numero di cassette di ogni inverter:

$$I_{CC2} = n \cdot 1,25 \cdot I_{SC} = 12 \cdot 1,25 \cdot 8,59 = 128,88A$$

$$I_{CC2(m-1)} = (m-1) \cdot n \cdot 1,25 \cdot I_{SC} = 5 \cdot I_{CC2} = 644,40A$$

$$I_{CC2,Tot.} = I_{CC2} + I_{CC2(m-1)} = 773,28A$$

con potenza d'arco pari a:

$$P_{arc,2} = 12 \cdot 1,25 \cdot P_{n,max-totale} = 12 \cdot 1,25 \cdot 4,80 = 72,00kW$$

Caso 3: guasto verso terra sul cavo A.C. di collegamento inverter e Quadro di Parallelo.

Un cortocircuito su un cavo di collegamento tra l'inverter e il quadro di parallelo, viene alimentato simultaneamente a monte dall'inverter in questione (I_{CC3}) e a valle da tutti gli (y-1) inverter con y numero massimo di inverter collegati al quadro di parallelo:

$$I_{CC3} = m \cdot n \cdot I_{CC1} = 6 \cdot 12 \cdot 10,74 = 773,28A$$

$$I_{CC3(y-1)} = (y-1) \cdot m \cdot n \cdot I_{CC1} = (y-1) \cdot I_{CC3} = 2 \cdot I_{CC3} = 1546,56A$$

$$I_{CC3,Tot.} = I_{CC3} + I_{CC3(y-1)} = 2319,84A$$

Con potenza d'arco pari a:

$$P_{arc,3} = 6 \cdot 12 \cdot 1,25 \cdot P_{n,max-totale} = 6 \cdot 12 \cdot 1,25 \cdot 4,8 = 432,00kW$$

Caso 4 e 5: guasto verso terra sul cavo A.C. di collegamento tra Quadro di Parallelo e Trasformatore bt/MT.

Un cortocircuito sul cavo A.C. di collegamento tra il quadro di parallelo e il trasformatore (0,32/15kV – 1000 kVA) è alimentato dai tre inverter collegati al Quadro di parallelo:

$$I_{CC4} = y \cdot m \cdot n \cdot I_{CC1} = 3 \cdot 6 \cdot 12 \cdot 10,74 = 2319,84A$$

Nel calcolo di questa corrente di cortocircuito abbiamo ommesso l'impedenza di linea, che riportata sul lato primario del trasformatore vale:

$$I_{CC5} = I_{CC4} \cdot \frac{0,32}{15} = 49,30A$$

$$P_{arc,4} = 3 \cdot 6 \cdot 12 \cdot 1,25 \cdot P_{n,max-totale} = 3 \cdot 6 \cdot 12 \cdot 1,25 \cdot 4,80 = 1296,00kW$$

RISULTATI ANALISI ARC FLASH

I risultati dell'analisi Arc Flash condotta sul sotto campo fotovoltaico da 1MW, nei punti di valutazione considerati e con i valori delle correnti di cortocircuito e delle potenze d'arco calcolate sono riassunte nella Tabella III.

I calcoli dell'energia radiante specifica sui lati D.C. del sistema sono stati eseguiti applicando la relazione 9 mentre sul lato A.C. in MT è stato applicato il Metodo di Lee (Nodo 5 A.C.). Abbiamo considerato inoltre sul lato D.C. il massimo tempo di esposizione ad Arc Flash previsto dallo standard NFPA 70E pari a 2 secondi e di 0,2 secondi sul lato A.C.

Riducendo i tempi di esposizione all'arco si riducono le energie radiate e di conseguenza la categoria di rischio e la categoria di DPI associato al rischio.

TABELLA III: RISULTATI DI CALCOLO ARC FLASH NEI PUNTI INDICATI

Nodo di valutazione Arc Flash	Distanza di Lavoro in [cm]	Tempo di esposizione In [s]	Energia radiata in aria [cal/cm ²]	Cat. Rischio e Cat. DPI
1 (D.C.)	30	2	0,38	0
2 (D.C.)	30	2	2,88	1
3 (A.C.)	30	0,2	7,39	2
4 (A.C.)	30	0,2	7,39	2
5 (A.C.)	30	0,2	8,9	3

CONCLUSIONI

I dispositivi di protezione tradizionali, quali fusibili, interruttori automatici e differenziali non sono adatti alla rilevazione di guasti d'arco. Negli ultimi anni sono stati sviluppati dispositivi di protezione tipo AFDD (Arc Fault Detector Devices) e relè che individuano il flash luminoso (light sensor) pilotando una bobina d'apertura sull'interruttore di linea. Tali protezioni sono in grado di far intervenire l'apertura dell'interruttore automatico in tempi estremamente rapidi (5-10 ms) in modo da evitare l'esposizione all'arco per tempi che potrebbero rivelarsi fatali per gli operatori o per lo stesso impianto. E' necessario pertanto, in fase di progettazione, rendere l'impianto sicuro, visto che la prima valutazione del rischio elettrico è demandata al progettista (art. 22 del D.Lvo 81/2008 in materia di responsabilità del progettista).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cantor, W., Zakielarz, P., Spina, M. "DC Arc Flash, The Implementation of NFPA 70E 2012 on Battery Maintenance" Battcon 2012 International Battery Conference. 2012 Hollywood, FL.
- [2] NFPA 70E-2012, "Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces", Copyright 2012, National Fire Protection Association.

Importance of Arc Flash analysis in e-mobility

F. Grasso, A. Reatti, P. A. Scarpino, G. Talluri
Department of Information Engineering – School of Engineering
University of Florence (Italy)

G. Cafaro
Department of Electrical and Information Engineering
Polytechnic of Bari (Italy)

Abstract— The advanced development of e-mobility, now established and consolidated, focuses on maintenance and rescue procedures on electric or hybrid vehicles on which Arc Flash phenomena can occur that may involve maintenance workers and rescuers. These phenomena mainly occur in direct current in the electrical energy storage system, consisting of batteries or super capacitors whose voltages can reach up to 800 VDC. In our opinion, it is the task of the vehicle manufacturer to conduct a risk analysis by Arc Flash to be included in the rescue sheet or in the vehicle use and maintenance manual. The article exposes the use of arc flash analysis in d.c. in e-mobility in order to provide maintenance and rescuers with useful safety information.

I. INTRODUCTION

In recent years, we have witnessed a remarkable implementation of electric and hybrid vehicles for e-mobility, which need a high electrical power guaranteed by the accumulation through batteries or super capacitors.

These DC storage systems present a very insidious danger, such as the occurrence of an Arc Flash, both in the maintenance phase and during the rescue following accidents, involving maintenance workers and rescuers.

In fact, both batteries and high voltage super capacitors are non-deactivable accumulators which, in case of improper use, involve considerable risks for the safety of operators, rescuers and drivers themselves.

The vehicle manufacturer must, in our opinion, give all the necessary information on the use of specific PPE to protect maintenance workers and rescuers from a likely risk of electric arc. Each e-mobility vehicle uses storage systems, the result of internal scientific and technological research, which require, in light of the above, an in-depth and dedicated Arc Flash risk assessment for each type of vehicle.

In the event of a double fault due to loss of insulation of the high voltage circuits, the passenger compartment could be subject to dangerous potentials.

For this reason, each vehicle has an insulation monitoring system capable of disconnecting all energy sources, guaranteeing safety, from direct or indirect electrical contacts, to drivers, operators and any rescuers.

Most electric vehicles are equipped with sensors connected to the airbag control system which in the event of a collision disconnect the fuel systems. Electronic safety devices due to the development of sensors and called pyro-fuses, deactivate the vehicle's power supply circuits in a fraction of a second, exploiting small explosive charges with the aim of interrupting the flow of current on the electric power cables.

However, it is not possible to exclude situations of probable danger that can occur when this system, for reasons that are not comprehensible, could lose its effectiveness and that upon the occurrence of the first fault, electric arcs could generate Arc Flash phenomena involving the maintenance workers and the rescuers. The occurrence of an Arc Flash during insertion or disconnection of the plug for charging the vehicle is completely negligible. In the event of an accident, even if the accumulation management and control systems have ensured vehicle safety, operations for removal from the accident site remain critical. During this operation, the rescuers must implement all the procedures for the complete discharge of the accumulation systems capable of generating electrical risks of electrocution and Arc Flash.

The electrical systems that can generate Arc Flash phenomena in an electric or hybrid car in order of severity are:

- The storage system (batteries or super capacitors) whose direct current voltage can reach significant values even up to 800 V_{d.c.};
- The DC / DC conversion system;
- The traction system (engine).

Fig. 1 shows an electric car with the fundamental parts of which it is made sensitive to risks of an electrical nature.

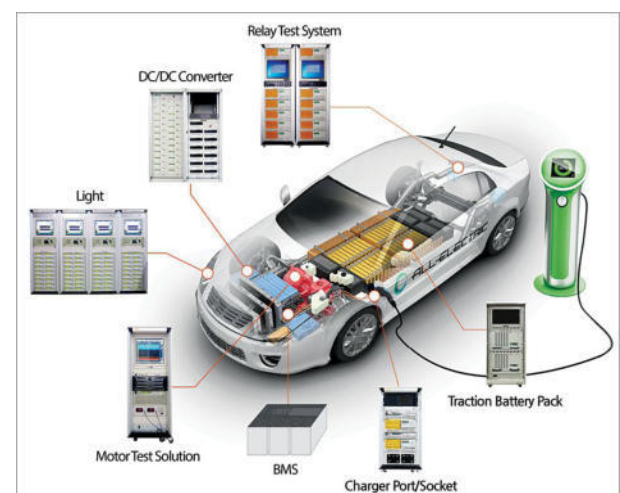


Fig. 1: Essential parts of an electric car with risk of electric arcs.

Most of the spaces, as it is easily visible, are occupied by lithium-ion batteries. The composition of the storage systems starts from the single cell and then forms the modules, systems, units and drive units (Fig. 2). In the event of an accident, with significant deformation of the passenger compartment, even the

part where the drive units are allocated, suffers serious damage with probable danger of electric arcs which can also cause the fire as well as the escape of dangerous liquids from the batteries.

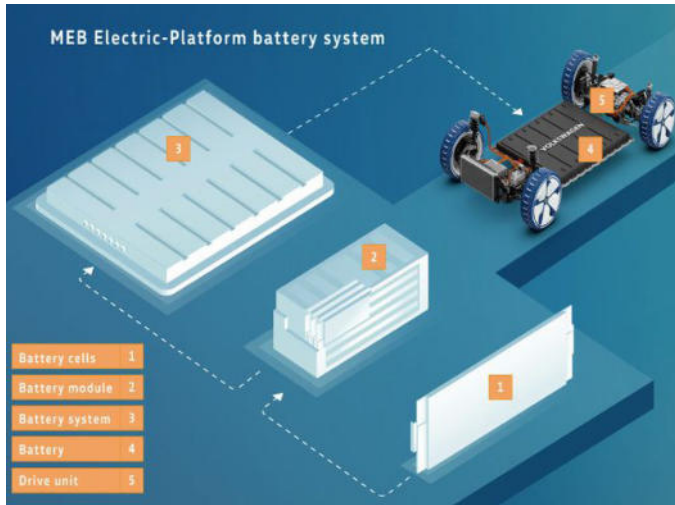


Fig. 2: Composition of the electricity storage system

The seriousness of the danger, and therefore of the damage associated with it, will be dictated by the specific training that the maintenance technician and / or the rescuer have received.

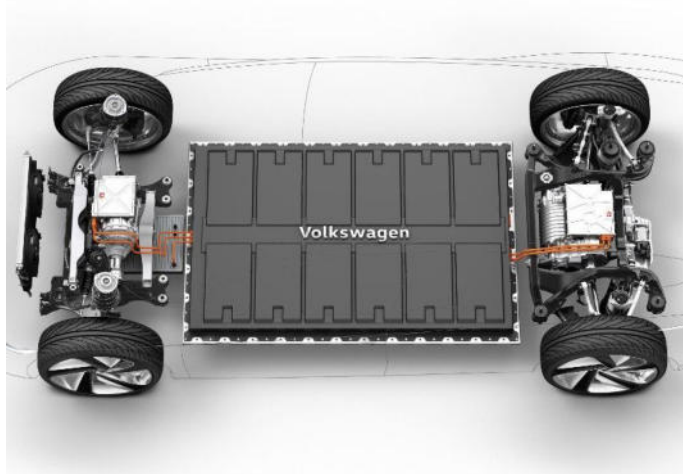


Fig. 3: Overall dimensions of the storage system in an electric car

The types of electric arcs that can occur in an e-mobility vehicle are basically two:

- series-type electric arcs;
- parallel electric arcs;

The series arcs occur due to false contacts between conductors and the terminal block or on the same (+) or (-) damaged conductor. These electric arcs (series faults) can be intercepted and interrupted with devices that detect the arc and recognized in the commercial field with the term AFDD (Arc Fault Detection Device). Series-type electric arcs do not have a

significant energy content and almost never generate Arc Flash phenomena but can generate fires.

The parallel arcs, on the other hand, occur by contact between conductors of opposite poles or by a metal arc on poles or active parts that are not suitably protected or left unprotected following an incorrect maintenance intervention. In such cases, the arc flash phenomena could be significant with serious consequences for the operators involved.

In fact, once the electric arc has established, it is not easy to interrupt it since the arc current never crosses the time axis and the protections, even if they intervene they are still bypassed by the storage systems that guarantee always and in any case an electric potential supporting the arc until the time of complete destruction of the component or system.

II. ASSESSMENT METHODS

In 2012, the NFPA 70E Standard [1] defined the exposure time limit in direct current as 2 seconds. This time limit is motivated by the fact that in electrochemical storage systems, even if the protections intervened, these would still support the arc up to a maximum time of 2 seconds beyond which there would be complete destruction with consequent extinction of the arc.

The exposure time of 2 seconds represents an upper limit for the analysis from Arc Flash in d.c. The reference scale of radiant energies in the case of Arc Flash D.C. it is represented by the risk table shown here.

TABLE I: ARC FLASH RISK ASSESSMENT TABLE

Radiant Energy E_c value calculated in [cal/cm^2]	Risk Category	PPE Category
$0 < E_c \leq 1.2$	0	0
$1.2 < E_c \leq 4$	1	1
$4 < E_c \leq 8$	2	2
$8 < E_c \leq 25$	3	3
$25 < E_c \leq 40$	4	4
$E_c > 40$	There are no protections from Arc Flash	

The purpose of the assessment is to calculate the radiant energy emitted by the Arc Flash and to compare it with Table I, which provides the category of risk and the category of PPE (Personal Protective Equipment) associated.

The IEEE 1584 standard, although the one most used for the evaluation of the Arc Flash in alternating current, in direct current does not provide any indication.

There are basically two methods known today for evaluating Arc Flash in direct current:

- Maximum power method, due to Daniel Doan (2007), who assumes that the maximum power for an arc flash occurs when the arc voltage drops to 50% of the supply voltage [2];
- Ammerman-Gammon et Al. Method (2009) of an empirical type that determines the radiated energy through the calculation of arc resistance and arc current [3].

However, the two methods recognize that the distribution of the specific radiated energy incident in the air is spherical, the

expression of which can be calculated through the following relationship:

$$E_{S,calc} = \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) \quad [\text{J/cm}^2] \quad (1)$$

where P_{arc} is the maximum power released by the arc expressed in [W], t_{exp} is the time of exposure to the arc expressed in [s] (maximum arc duration time of 2 seconds in accordance with Annex D NFPA- 70E) and D is the working distance, that is the distance at which the operator is from the emission point expressed in [cm].

The results obtained from (1), converted into [cal/cm^2] are compared with the ranges of values in the Risk Table for the evaluation of the risk due to Arc Flash (Table I).

The specific energy radiated inside a closed structure (box), such as an e-mobility motor vehicle, an inverter, a junction box etc., can be calculated from the previous expression by simply multiplying it by the factor 3, by indicate that in a closed structure at least three sides are constrained and therefore we have:

$$E_{S,calc.} = 3 \cdot \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) \quad [\text{J/cm}^2] \quad (2)$$

III. DIRECT CURRENT ANALYSIS METHOD.

The system to which we must refer is represented by the equivalent circuit diagram shown in Figure 4, where V_{DC} represents the total voltage of the driver unit system, $R_{system} = R_{battery} + R_{conductor}$ is the equivalent direct current resistance seen by the fault node and calculated according to Thevenin Principle and includes connector cables and cells, while R_{arc} expresses arc resistance.[1]

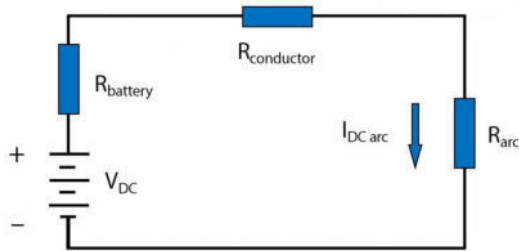


Fig. 4: Equivalent circuit model for calculating the arc current.

Since the power in DC systems is given by the simple expression:

$$P = V_{d.c.} \cdot I_{d.c.} \quad (3)$$

and, as is known in scientific literature, the maximum power emitted during an arc phenomenon occurs when the arc voltage (V_{arc}) reaches 50% of the nominal voltage to which the system is subject, i.e. when $V_{arc} = 0.5V_n$.

In conditions of arc flash phenomenon we can therefore write:

$$P_{arc} = V_{arc} \cdot I_{arc} = \frac{1}{2} V_{system} \cdot I_{arc} = R_{arc} \cdot I_{arc}^2 \quad (4)$$

The NFPA 70E - 2015 Annex D standard proposes a method for calculating I_{arc} in batteries in relation to the short-circuit current I_{sc} :

$$I_{arc} = 0.5 \cdot I_{sc} \quad (5)$$

Substituting the relation (6) in (5) we have:

$$P_{arc} = \frac{1}{4} V_{system} \cdot I_{sc} \quad [\text{W}] \quad (6)$$

Taking into consideration the condition of Arc Flash inside a case and replacing the expressions found in (2), we have:

$$E_{S,calc.} = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{V_{system} \cdot I_{sc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) \quad [\text{J/cm}^2] \quad (7)$$

The Ammerman et Others method [3] and the Stokes and Oppenlander relations [4], in the hypotheses of validity of the circuit of the previous figure, allows us to calculate the arc resistance and the arc current through the relations:

$$I_{arc} = \frac{V_{system}}{R_{system} + R_{arc}} \quad (8)$$

$$R_{arc} = \frac{20 + 0.534 \cdot G}{I_{arc}^{0.88}} \quad (9)$$

where G is the distance of the gap in mm which varies from 12.7 mm to 558.8 mm.

One way to determine the I_{arc} and R_{arc} values is to use an iterative process starting from an initial estimate of one of the unknown quantities and defining a stopping criterion on the variables involved.

For the storage system of an e-mobility vehicle, made with lithium-ion batteries, it is possible to apply Annex D of St. NFPA-70E as a choice of the initial estimate of the arc current, imposing:

$$I_{arc}^{(0)} = 0.5 \cdot I_{sc} \quad (10)$$

where the term I_{sc} represents the standard short-circuit current indicated by the manufacturer and, the stopping criterion is defined on the arc current I_{arc} , by means of the following relationship:

$$\left| I_{arc}^{(i)} - I_{arc}^{(i-1)} \right| < \varepsilon_I \quad (11)$$

with ε_I tolerance on arc current. An acceptable value could be $\varepsilon_I < 10A$.

From the considerations made, the relationships (8) and (9) take the iterative form:

$$\begin{cases} I_{arc}^{(i)} = \frac{V_{system}}{R_{system} + R_{arc}^{(i)}} \\ R_{arc}^{(i)} = \frac{20 + 0.534 \cdot G}{[I_{arc}^{(i-1)}]^{0.88}} \end{cases} \quad (12)$$

At the convergence of the iterative process, the values of I_{arc} and R_{arc} obtained from (12) allow us to determine the specific radiant incident energy, written according to these quantities:

$$E_{S,calc.} = 3 \left(\frac{R_{arc} \cdot I_{arc}^2 \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) \quad [\text{J/cm}^2] \quad (13)$$

The risk category and associated specific PPE is identified in Table I according to the interval of incident radiated energy calculated with (13) and transformed into cal/cm^2 .

IV. CASE STUDY.

An example of arc flash calculation was carried out on an electric car that uses an electrical energy storage system consisting of lithium-ion batteries. The characteristics of interest of each individual cell, for the purposes of Arc Flash analysis in crash or short circuit conditions, are shown in table II:

Table II: Electrical sizes Lithium ion cell.

Electrical sizes	Cell
V_{max} (V)	4.10
V_{min} (V)	2.70
V_n (V)	3.2
R_s (10s) ($m\Omega$)	1.22

We will demonstrate that the electrical risk from Arc Flash occurs exclusively in the event of operator contact with active parts following a crash, rescue or maintenance intervention. [5]. In nominal conditions, the overall storage system for the electric car in question has the following characteristics:

TABELLA III: STORAGE SYSTEM

Electrical Parameters	
Nominal voltage single cell	3.2 V
Number of cells	200
Total rated voltage (V_{system})	640 V
Internal resistance of single cell during discharge R_s (10s)	1.22 ($m\Omega$)
Standard Short Circuit Current (Isc) cell	8.21 A
Total Standard Short Circuit Current	1.642 A
Total internal resistance during discharge R_s (10s) di scarica R_s (10s)	244 ($m\Omega$)
Gap (G) Celle	17.5 (mm)
Total resistance including connections and connections.	284 ($m\Omega$)

Arc Flash crash calculations will be performed by sequentially applying the relationships (5), (9) and (8). The (5) expresses the initial condition of the iterative method in order to start the iterative process with the calculation of the R_{arc} from the expression (9) and subsequently calculate the first iteration for the I_{arc} and so on until reaching convergence with $\epsilon_1 < 1A$. The iterative process is described below:

N° Iterations	I_{arc} [A]	R_{arc} [Ω]
0	$I_{arc}=0.5I_{sc}$	
1	$I_{arc} = \left(\frac{V_{system}}{R_{system} + R_{arc}^{(i-1)}} \right) = 821.00 A$	$R_{arc} = \left(\frac{20+0.534 \cdot G}{I_{arc}^{0.88}} \right) = 0.08 \Omega$
3	1,758.40	0.029
4	2,052.06	0.024
5	2,075.04	0.024
6	2,077.23	0.024
7	2,077.38	0.024

The iterative process is stopped on the seventh iterations and provides the results:

$$R_{arc} = 0.0024 \Omega \text{ e } I_{arc} = 2.08 \text{ kA}, \epsilon_1 = 0.16 \text{ A}$$

The Arc Flash Boundary is equal to 0.2 cm, distance measured in centimetric beyond which the incident specific radiant energy is reduced to 1.2 cal/cm^2 . This means that there will be no electrical risks from arc flash until the operator or occupant of the passenger compartment comes into direct contact with active parts.

In this condition, the specific radiated incident energy, calculated with (13) and transformed into cal/cm^2 , is equal to 20.79 cal/cm^2 .

V. CONCLUSIONS.

The Article highlights that Arc Flash risk in e-mobility systems exists only if they are close to direct contact with active parts given the modest arc current value. Under these conditions, an electric risk from electrocution and from Arc Flash cannot be excluded if the vehicle occupants or rescuers were to come into contact with active parts whose Arc Flash event would lead to the development of significant radiant energies.

The manufacturers of electric or hybrid cars do not report in the risk sheets the category of PPE to be used by maintenance workers and rescuers in case of risk from Arc Flash even if significant only in the vicinity of the active parts. Risk mitigation can be obtained either with adequate intervention safety procedures or through the use of PPE whose choice must be derived from an Arc Flash analysis.

The proposed analysis is a useful tool for manufacturers of electric or hybrid vehicles who can make use of the methodologies adopted here to provide maintenance workers and rescuers with useful safety information in the event of an Arc Flash.

REFERENCES

- [1] NFPA-70E (2018) Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces;
- [2] Ralph LEE – The other electrical hazard: Electrical arc blast burns. IEEE Trans on Ind. Appl. Vol 1A-18, n. 3 pp. 246-251, May/June 1982;
- [3] R.F. Ammerman, T. Gammon, P. K. Sen, J. P. Nelson: DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations. IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. 46, n. 5, pp 1810-1819, Oct. 2010;
- [4] A. D. Stokes and W. T Oppenlander: Electrica arcs in open air. J Phys. D, vol. 24, pp. 26-35, Jan. 1991;
- [5] D. Anséan, M. González, J. C. Viera, J. C. Alvarez, C. Blanco, V. M. Garcia: Electrical Vehicle Li-ion Battery Evaluation based on Internal Resistance Analisis. IEEE 978-1-4799-6782-7/14.

Tecniche di valutazione e riduzione del rischio elettrico dovuto ad Arc Flash in A.C.

Dott. Ing. Pietro Antonio Scarpino, Ph.D
Presidente AEIT sezione Toscana e Umbria
Scuola di Ingegneria Università di Firenze

Abstract— L'articolo espone i metodi di valutazione del rischio elettrico dovuto ai fenomeni di archi elettrici con emissione di radiazioni elettromagnetiche meglio noti come Arc Flash. Tale valutazione rientra di diritto nella valutazione dei rischi prevista dall'art. 80 del D.lgs n. 81 del 9 aprile 2008 (Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro). Purtroppo nel nostro paese, ed in generale in Europa, non esiste nessuna normativa tecnica che ci consente di effettuare tale valutazione se non ricorrere a standard statunitensi. L'articolo oltre a proporre i metodi noti e ampiamente trattati nella letteratura scientifica oltre oceano per la valutazione del rischio da Arc Flash in corrente alternata (A.C.), espone anche una serie di tecniche di riduzione del rischio in modo da rendere sicuro il personale addetto ai lavori elettrici, adattando gli stessi standard con le distanze imposte dalla Norma CEI 11-27 in materia di lavori elettrici.

I. INTRODUZIONE

L'art. 80 del D.L. 81/2008 impone al datore di lavoro di prendere in considerazione tutti i rischi elettrici possibili ai quali i lavoratori possono essere soggetti per l'uso di macchinari, apparecchiature e impianti elettrici, in particolar modo tutti i rischi derivanti da contatti elettrici diretti e indiretti, da archi elettrici e radiazioni, ecc.. L'arc flash è un arco elettrico con emissione di radiazioni elettromagnetiche è pertanto deve essere valutato.

L'arc Flash, si verifica principalmente per arco metallico (cortocircuito) oppure per arco elettrico quando il campo elettrico supera la rigidità dielettrica del gas interposto tra parti attive trasformandolo in plasma e facendo sì che il gas interposto da dielettrico diventi conduttore.

Dalla teoria Termodinamica ogni corpo caldo emette energia radiante con lo stesso principio di emissione di un corpo nero e quindi la principale conseguenza del rilascio di tale energia è una potenza radiante globalmente emessa che varia con la nota Legge di Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_i = P_i = \sigma T^4$$

con $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \quad [\text{W/K}^4 \text{ m}^2]$

coefficiente di Stefan-Boltzmann .

$$P_i = 0,567 \cdot C_a (T_e^4 - T_a^4) \cdot 10^{-11} \quad [\text{W/cm}^2]$$

dove:

C_a rappresenta coefficiente di assorbimento;

T_e e T_a rappresentano rispettivamente le temperature della superficie emittente ed assorbente in gradi Kelvin.

Nonostante lo studio degli archi sia ormai vecchio di due secoli, la loro fisica non è ben compresa; in particolare non esiste una teoria ben soddisfacente che metta in relazione la corrente e la tensione durante il fenomeno di Arc Flash. Appare chiaro che la dinamica degli archi è legata alla fisica del trasporto radiale dell'energia in condizioni in cui il plasma è magnetizzato e turbolento.

In queste condizioni viene emessa una energia specifica radiante elevatissima in un tempo estremamente breve che rappresenta il tempo di esposizione agli effetti dell'arco e coincide con il tempo di apertura delle protezioni magnetiche. Durante questa fase la temperatura può raggiungere valori pari a 19.000°C (quattro volte la temperatura che si ha sulla superficie solare), viene espulso materiale fuso e incandescente, il metallo di cui sono costituite le parti attive in tensione passa ripetutamente dallo stato solido allo stato gassoso con emissione di gas tossici, si genera un'onda sonora con un livello di rumore di oltre 160dB con conseguente onda di pressione elevatissima e per ultimo un grande flash con l'emissione di radiazioni elettromagnetiche anche ionizzanti. Se il lavoratore si dovesse trovare nel campo di azione di un fenomeno di Arc Flash senza i dispositivi di protezione individuali adeguati, le conseguenze sarebbero di facile comprensione.

Il rischio elettrico dovuto ad Arc Flash si verifica principalmente nelle lavorazioni elettriche per le quali vige la Norma CEI 11-27 e la Norma CEI EN 50110-1. Questa ultima in particolare nell'allegato B al punto B.6 (ed. gennaio 2014) impone la valutazione del rischio dovuta agli effetti dell'arco elettrico.

L'uso di quadri elettrici resistenti all'arco interno (Rapporto Tecnico IEC 61641 e norma CEI EN 60439) non esula dalla valutazione del rischio da Arc Flash in quanto spesso è necessario effettuare verifiche e misure aprendo gli sportelli e rimuovendo le protezioni. In questa fase, anche se per un tempo abbastanza limitato, gli operatori si trovano completamente esposti al pericolo da Arc Flash.

La domanda che ci dobbiamo porre è la seguente: gli operatori elettrici con le qualifiche PES o PAV a che distanza dalla parte attiva devono trovarsi per ritenersi sicuri in caso di Arc Flash e

che tipi di dispositivi di protezione individuali (DPI) devono eventualmente utilizzare per proteggersi? (Fig. 1)
 Questa memoria propone le tecniche di valutazione dell'energia radiante, delle distanze di sicurezza e delle classi di dispositivi di protezione individuali in caso di Arc Flash, nonché le tecniche di riduzione del rischio.

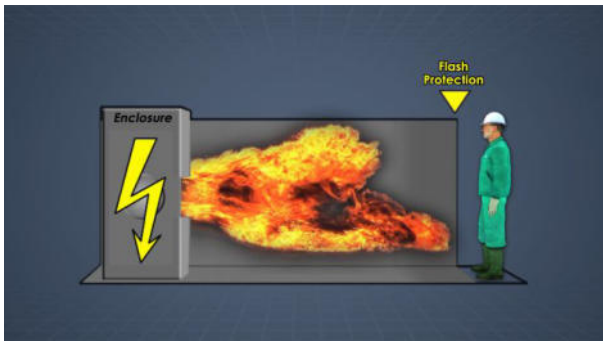


Fig. 1: distanza di sicurezza alla quale l'energia radiata si riduce a 1,2 cal/cm²

II. METODI DI VALUTAZIONE

Nonostante la legislazione in materia e le norme tecniche prevedono la valutazione del rischio elettrico dovuta agli effetti dell'arco elettrico, nessuna norma tecnica italiana ed europea ci fornisce una metodologia per poter procedere alla valutazione del rischio da Arc Flash.

E' importante quindi definire le zone entro le quali si possono verificare fenomeni di Arc Flash in modo da prendere tutte le precauzioni possibili per difenderci dagli effetti che ne derivano.

Dall'anno 1970 l'OSHA (Occupational Safety and Health Administration), l'ente U.S.A. che si occupa della sicurezza e salute nei luoghi di lavoro, ha mostrato un notevole interesse alla valutazione del rischio elettrico da Arc Flash. A tale proposito sono stati elaborati due standards di calcolo:

- NFPA-70E "Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces", emesso dal NFPA (National Fire Protection Associations)
- IEEE Std 1584-2002 "Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations", emesso dall'IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Ambedue gli standard consentono di calcolare, con formule empiriche, l'energia radiante incidente E_c in [cal/cm²], che si sviluppa in presenza di Arc Flash.

I due metodi di valutazione, anche se diversi nelle loro formulazioni, portano spesso agli stessi risultati, comunque sia il metodo IEEE 1584-2002 è da ritenersi più accurato.

In Fig. 2 è rappresentata la caratteristica di scarica elettrica nei gas. Durante il fenomeno di scarica elettrica dovuta all'arco la zona della caratteristica V-I che ci interessa durante un Arc Flash è quella in cui la corrente elettrica supera i valori di

qualche decina di Ampère e la variazione di tensione al variare della corrente è lentamente variabile con essa (tratto J-K della caratteristica). Questa zona della caratteristica è detta Arco Termico.

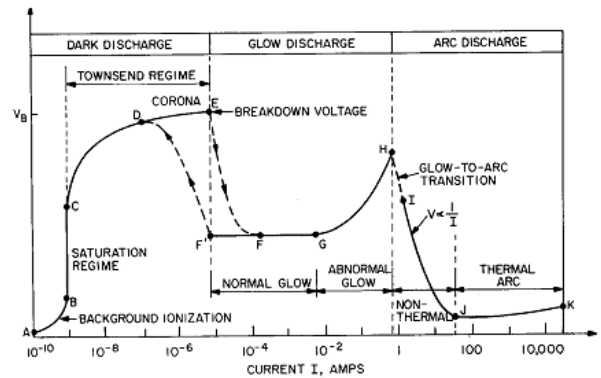


Fig. 2:caratteristica della scarica elettrica nei gas

Lo standard NFPA-70E definisce 5 classi di rischio a seconda dell'energia radiante emessa in caso di arc flash come mostrato nella tabella seguente:

TABELLA I : TABELLA DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA ARC FLASH.

Valore dell'Energia radiante E_c calcolata in [cal/cm ²]	Categoria di Rischio	Categoria DPI
$0 < E_c \leq 1,2$	0	0
$1,2 < E_c \leq 4$	1	1
$4 < E_c \leq 8$	2	2
$8 < E_c \leq 25$	3	3
$25 < E_c \leq 40$	4	4
$E_c > 40$	Non esistono protezioni da Arc Flash	

Lo scopo della valutazione è quello di calcolare l'energia radiante emessa da Arc flash e di confrontarla con la TABELLA I.

III. VALUTAZIONE DEL RISCHIO ELETTRICO DOVUTO AD ARC FLSH SECONDO LO STANDARD NFPA 70E

Questo standard si basa fondamentalmente sulla valutazione della *distanza limite di pericolo* in caso di Arc Flash. Se la lavorazione eseguita da personale elettrico (PAV-PES) con o senza idoneità per l'esecuzione di lavori elettrici sotto tensione, è all'interno del volume definito dalla sfera di raggio D_c (distanza di confine) si calcola l'energia radiante emessa da Arc Flash e quindi si individua la categoria di rischio e i DPI più appropriati per eseguire la lavorazione all'interno del volume sferico di raggio D_c .

Poiché l'Arc Flash avviene principalmente in condizioni di cortocircuito, si calcola la corrente di cortocircuito trifase I_{cc3F} nel punto della parte attiva oggetto della valutazione. [1][2]
 In prossimità dei morsetti BT di un trasformatore, la distanza di confine D_c può essere espressa in funzione della potenza apparente di cortocircuito trifase del trasformatore A_{cc3F} in

MVA, per trasformatori con potenza nominale apparente fino a 630 kVA, dalla relazione:

$$D_c = \sqrt{(2,65 \cdot A_{cc3F} \cdot t) \cdot 30,48} \quad [\text{cm}] \quad (1)$$

Mettendo in evidenza la corrente potenza apparente nominale del trasformatore possiamo scrivere:

$$D_c = \sqrt{(2,65 \cdot \frac{A_n}{z_{CC}\%} \cdot 100 \cdot t) \cdot 30,48}$$

ed essendo $z_{CC}\% = v_{CC}\%$ si ha:

$$D_c = \sqrt{(2,65 \cdot \frac{A_n}{v_{CC}\%} \cdot 100 \cdot t) \cdot 30,48} \quad [\text{cm}] \quad (2)$$

Se la potenza apparente nominale del trasformatore è maggiore di 630 KVA, l'espressione (2) deve essere modificata come segue:

$$D_c = \sqrt{(2,65 \cdot 1,25 \cdot \frac{A_n}{v_{CC}\%} \cdot 100 \cdot t) \cdot 30,48} \quad [\text{cm}] \quad (3)$$

Il fattore 30,48 è il parametro di conversione da piedi a centimetri (1ft=30,48 cm).

Se la lavorazione avviene all'interno del volume sferico di raggio D_c , si deve eseguire il calcolo dell'energia radiante (E_c) dovuta ad Arc Flash, mediante l'equazione empirica proposta dalla NFPA-70E che assume due espressioni distinte a seconda che la lavorazione avvenga in aria aperta oppure all'interno di un contenitore, quali Power Control Center, Motor Control Center, quadro BT, cassette metalliche o plastiche ecc. Per tensioni nominali inferiori a 0,6kV l'espressione dell'energia radiante assume la forma:

in aria:

$$E_A = 5271 \cdot \left(\frac{D_A}{2,54}\right)^{-1,9593} \cdot t_A \cdot (0,0016 \cdot I_{cc3F}^2 - 0,0076 \cdot I_{cc3F} + 0,8938) \quad [\text{cal/cm}^2] \quad (4)$$

in un contenitore:

$$E_B = 1038,7 \cdot \left(\frac{D_B}{2,54}\right)^{-1,4738} \cdot t_A \cdot (0,0093 \cdot I_{cc3F}^2 - 0,3453 \cdot I_{cc3F} + 5,9675) \quad [\text{cal/cm}^2] \quad (5)$$

• dove:

- D_A e D_B sono le distanze degli elettrodi attivi in centimetri, rispettivamente in aria aperta e all'interno di un armadio (box) espresse in [cm] avendo eseguito la conversione da pollici a centimetri (1"=2,54 cm);

- t_A è il tempo di durata dell'Arc Flash in secondi;
- I_{cc3F} è la corrente di cortocircuito trifase espressa in [kA].

Per tensioni nominali $0,6 \text{ kV} < V_n < 15 \text{ kV}$ l'energia radiante incidente assume l'espressione:

$$E = 793 \cdot \left(\frac{D}{2,54}\right)^{-2} \cdot t \cdot V_n \cdot I_{cc3F} \quad [\text{cal/cm}^2] \quad (5)$$

con D espresso in [cm], il tempo di esposizione in secondi, la tensione in [kV] e la corrente di cortocircuito in [kA].

Una volta calcolata l'Energia radiante (E_c) tramite le relazioni (4) oppure (5), viene individuata la categoria di rischio e quindi la classe di DPI da assegnare ai lavoratori tramite confronto con la TABELLA I. [2]

IV. VALUTAZIONE DEL RISCHIO ELETTRICO DOVUTO AD ARC FLSH SECONDO LO STANDARD IEEE 1584

Lo standard IEEE 1584-2002 è un altro metodo di valutazione del rischio elettrico dovuto ad Arc Flash più accurato del precedente. Esso si basa sulla determinazione della corrente elettrica d'arco per sistemi elettrici di categoria I in corrente alternata (tensione nominale inferiore a 1 kV). L'espressione della corrente d'arco, deriva da equazioni empiriche su fenomeni di Arc Flash creati e simulati in laboratorio, i cui dati sono stati sviluppati con l'ausilio dell'analisi statistica.[3]

L'espressione della corrente d'arco I_{arc} è data da:

$$I_{arc} = 10^{\log_{10}(I_{arc})} \quad [\text{kA}] \quad (6)$$

dove:

$$\log_{10} I_{arc} = K_A + 0,662 \cdot \log_{10} I_{cc3F} + 0,0966 \cdot V + 0,000526 \cdot G + 0,5588 \cdot V \cdot \log_{10} I_{cc3F} - 0,00304 \cdot G \cdot \log_{10} I_{cc3F} \quad (7)$$

dove:

- $K_A = -0,153$ in aria aperta e $K_A = -0,097$ al chiuso;
- I_{cc3F} è la corrente di cortocircuito trifase in [kA] nel punto di valutazione;
- V è la tensione nominale del sistema elettrico misurata in [kV];
- G è la distanza misurata in [mm] tra gli elettrodi o tra i conduttori dove si sviluppa l'arco.

Una volta determinata la corrente d'arco è possibile calcolare l'energia radiante incidente, normalizzata per un Arc Flash della durata di 0,2 s e alla distanza di lavoro di 610 mm, attraverso le relazioni:

TABELLA II: FATTORI DI DISTANZA IN FUNZIONE DELLA TENSIONE .

Tensione [kV]	Equipaggiamento	Distanza tipica tra conduttori (gap) [mm]	Fattore di distanza x
0,208<V≤1	Open Air	10-40	2,00
	Switchgear	32	1,473
	MCC ad panels	25	1,641
	Cable	13	2,00
1<V≤5	Open Air	102	2,00
	Switchgear	13-102	0,973
	Cable	13	2,00
5<V<15	Open Air	13-153	2,00
	Switchgear	153	0,973
	Cable	13	2,00

$$\log_{10} E_n = K_1 + K_2 + 1,0811 \cdot G \cdot \log_{10} I_{arc} + 0,0011 \cdot G \quad (8)$$

$$E_n = 10^{\log_{10}(E_n)} \quad [\text{cal/cm}^2] \quad (9)$$

dove:

- ♦ $K_1 = -0,792$ in aria aperta e $K_1 = -0,555$ al chiuso;
- ♦ $K_2 = 0$ per sistemi elettrici con distribuzione di tipo TT e TN;
- ♦ $K_2 = -0,113$ per sistemi elettrici con distribuzione IT.;
- ♦ $\log_{10} I_{arc}$ è la corrente di flash arco calcolata con l'espressione (7);
- ♦ G è la distanza misurata in [mm] tra gli elettrodi o tra i conduttori dove si sviluppa l'arco.

L'energia radiante incidente dovuta ad Arc Flash della durata di t secondi, su un lavoratore che si trova a distanza D, misurata in [mm], dal punto dove si verifica il fenomeno, è data da:

$$E = C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2}\right) \cdot \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad [\text{cal/cm}^2] \quad (10)$$

oppure

$$E = 4,184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2}\right) \cdot \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad [\text{J/cm}^2] \quad (11)$$

Le espressioni (10) o (11) si applicano per calcolare l'energia incidente in sistemi elettrici con tensioni nominali fino a 15 kV. Per tensioni superiori a 15 kV, l'energia radiante incidente dovuta ad Arc Flash viene calcolata attraverso il metodo di Lee:

$$E = 5,12 \cdot x \cdot 10^5 \cdot V \cdot I_{cc3F} \cdot \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad [\text{cal/cm}^2] \quad (12)$$

dove:

- ♦ C_f : è un fattore di calcolo che vale 1 per sistemi con tensioni nominali inferiori a 1kV e 1,5 per sistemi con $1 \text{ kV} < V_n \leq 15 \text{ kV}$;
- ♦ x: è un fattore distanza, tabulato che dipende dalla tensione e dalla distanza tra gli elettrodi o tra i conduttori dove si sviluppa l'arco.

Nella Tabella II viene riportato il fattore di distanza x, in relazione alla tensione del sistema di alimentazione, al gap (distanza fra conduttori attivi) e al tipo di struttura.

Calcolata l'energia radiante incidente, con la relazione (10) o con la relazione (12) del metodo di Lee, è possibile calcolare la **distanza di confine** D_B , distanza dove l'energia radiante incidente dovuta ad Arc Flash assume il valore di $E=1,2$ [cal/cm²] oltre il quale siamo soggetti a rischio Arc flash.

La distanza di confine può essere calcolata con la relazione:

$$D_B = \left[C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2}\right) \cdot \left(\frac{610}{E}\right)^x \right]^{\frac{1}{x}} \quad [\text{mm}] \quad (13)$$

valida per sistemi elettrici con $V_n \leq 15$ kV;

$$D_B = \sqrt{5,12 \cdot x \cdot 10^5 \cdot V \cdot I_{cc3F} \cdot \left(\frac{t}{E}\right)} \quad [\text{mm}] \quad (14)$$

valida per sistemi elettrici con $V_n > 15$ kV (metodo di Lee).[1][3]

V. CLASSIFICAZIONE E SCELTA DEI DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALI (DPI) RESISTENTI ALL'ARCO.

La normativa di riferimento sugli indumenti di protezione contro gli effetti dell'arco elettrico in campo internazionale è la seguente:

- IEC 61482-2 "indumenti di protezione contro gli effetti termici dell'arco elettrico – requisiti dell'indumento"
- IEC 61482-1-1 "metodo di prova – determinazione dell'ATPV Arc Thermal Performance Value"
- CEI EN 61482-1-2 "metodo di prova – determinazione delle classi di protezione dall'arco elettrico di materiale e indumento usando il metodo dell'arco forzato e diretto"

Il metodo illustrato nella norma IEC 61482-1-1 consente di rilevare l'ATPV (Arc Thermal Performance Value), che definisce il limite di energia termica in termini di calore convettivo radiante che un tessuto può sopportare prima che l'utilizzatore subisca ustioni di 2° grado. Maggiore è l'ATPV maggiore è la protezione offerta dall'indumento.

La classificazione dei rischi e delle performance degli indumenti protettivi, conformemente ai valori di ATPV, è data dalla Norma NFPA 70E e riassunti nella Tabella III.

TABELLA IV: CARATTERISTICHE DEGLI INDUMENTI PER ARC FLASH

Energia radiante incidente in [cal/cm ²]	Classificazione Abbigliamento	Tipo di indumento da utilizzare (Flame Resistant FR)	Peso [gr/m ²]	Livello protezione ustioni di 2° grado ATPV [cal/cm ²]
0 < E _c ≤ 2	0	No FR	150-240	N/A
2 < E _c ≤ 5	1	camicia e pantaloni FR	150-270	5 ≤ ATPV ≤ 7
5 < E _c ≤ 8	2A	Indumenti intimi no FR + camicia e pantaloni FR	300-400	8 ≤ ATPV ≤ 18
8 < E _c ≤ 16	2B	Indumenti intimi no FR + camicia e pantaloni FR + tuta FR	340-480	16 ≤ ATPV ≤ 22
16 < E _c ≤ 25	3	Indumenti intimi no FR + camicia e pantaloni FR + tuta FR	540-680	25 ≤ ATPV ≤ 50
25 < E _c ≤ 40	3	Indumenti intimi no FR + camicia e pantaloni FR + cappotto a doppio strato FR	800-1000	40 ≤ ATPV ≤ 60

Nel metodo di prova con arco elettrico diretto e forzato (CEI EN 61482-1-2), metodo europeo, le prove sono effettuate secondo 2 classi in base alla corrente di cortocircuito presunta. Il grado di protezione termica, è stabilito in condizioni di prova d'arco specificate.

Il metodo riproduce le condizioni di esposizione all'arco nei sistemi a bassa tensione (lavori in prossimità di scatole di derivazione, quadri di distribuzione, cabine elettriche di distribuzione, ecc.) in cui l'arco è diretto verso l'operatore in direzione dello sterno.

Vengono testati su un manichino a mezzo busto i materiali e gli indumenti per valutarne le risposte all'esposizione all'arco sui fili delle cinture, sulle chiusure, sul tessuto e sugli altri accessori.

In base a questa normativa (CEI EN 61482-1-2), vengono definite due classi di protezione:

TABELLA IV

Classe	Corrente di prova [kA]	Tensione di prova in A.C. [V]	Tempo di durata dell'arco [ms]
1	4	400	500
2	7	400	500

Per quanto riguarda i requisiti dell'indumento, l'associazione che deve essere fatta in funzione dell'energia radiata incidente da Arc Flash, è la seguente:

- Se l'indumento è stato provato con la norma IEC 61482-1-1 il valore minimo deve essere ATPV ≥ 4 cal/cm² (167,5 KJ/m²);
- Se l'indumento è stato provato con la norma CEI EN 61482 1-2, il materiale e l'indumento devono superare il test per la classe 1 o 2.
- Secondo la norma CEI EN 61482-2 i requisiti dell'indumento sono i seguenti:
 - Tutti i materiali devono essere resistenti all'arco elettrico;
 - Le chiusure devono essere progettate in modo che dopo l'esposizione all'arco devono essere funzionanti;
 - Non è permesso alcun materiale metallico esposto all'esterno;
 - La parte frontale dell'indumento e le maniche devono avere le stesse prestazioni se esposti all'arco elettrico;
 - Il filato per le cuciture non deve presentare fusione e combustione alla prova di resistenza al calore (5 minuti a 260 °C).

VI. ESEMPIO DI VALUTAZIONE ARC FLASH.

A titolo semplificato effettuiamo la valutazione del rischio Arc Flash in una cabina MT/bt d'utente (Fig. 3).
 Dati Trasformatore: An=630kVA; K=15000/400; vcc=6% Dyn11. Nella Tabella V, sono stati riportati i calcoli di Arc Flash effettuati nei punti 1 e 2 dello schema alle distanze di guardia (D_L) e di lavoro (D_V) per i lavori sotto tensione indicate nella Norma CEI 11-27.

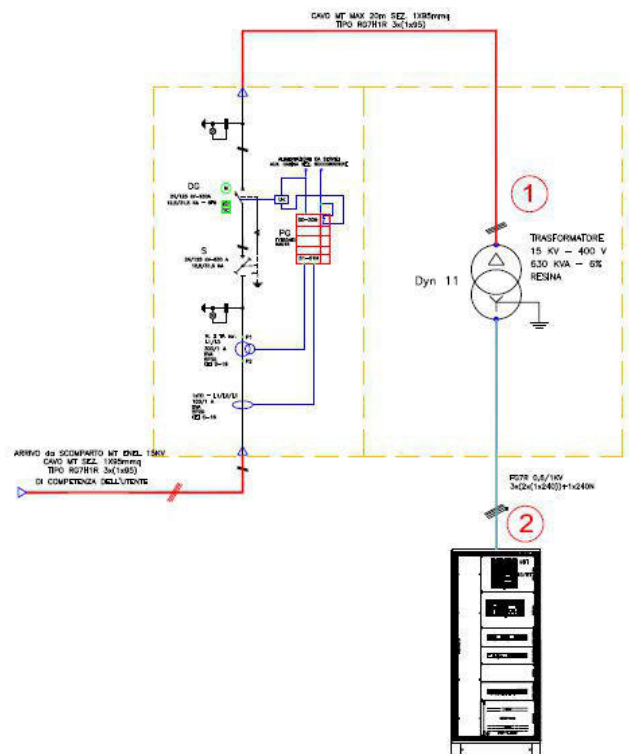


Fig. 3: Schema elettrico di cabina MT/BT d'utente sottoposta a test.

TABELLA V: RISULTATI CALCOLI DI ARC FLASH

Grandezze	Punto 1 di Valutazione Arc Flash	Punto 2 di Valutazione Arc Flash
Tensione [kV]	15	0,4
Corrente di cortocircuito trifase [kA]	0,4	15,16
Tempo di esposizione (tempo di apertura protezione magnetica) [s]	0,12 (tempo apertura relè 50)	0,1 (tempo apertura relè magnetico)
Distanza personale dalla parte attiva in tensione [mm]	160 (Dl. CEI 11-27)	300 (Dv CEI 11-27)
Energia incidente radiata in aria [cal/cm ²]	3,35 (Metodo di Lee)	4,79 (Metodo NFPA 70E) 5,89 (Metodo IEEE 1584)
Categoria di Rischio	1	2
Categoria DPI	1	2

Le tecniche di riduzione dell'Arc Flash consistono nell'intervenire sulle grandezze fisiche da cui esso dipende:

- ♦ I_{cc3F} : è possibile ridurre la corrente d'arco usando interruttori limitatori.
- ♦ tempo di esposizione: è possibile ridurre il tempo di esposizione all'arco intervenendo sul tempo di intervento della protezione magnetica; a 70ms, $E_c = 3,35$ [cal/cm²] ⇒ Categoria di rischio 1 (rispetto al caso di tabella V); a 15 ms, $E_c = 0,72$ [cal/cm²] ⇒ Categoria di rischio 0. Tali condizioni si possono realizzare attuare attraverso una mirata selettività logica delle protezioni magnetiche le quali devono essere predisposte per tale funzione (protezioni di tipo elettroniche).
- ♦ Utilizzando relè Arc Flash, i quali tramite dei sensori luminosi (light sensor) bypassano tutte le protezioni magnetiche imponendo all'interruttore di aprire a prescindere della taratura della protezione magnetica. Tali dispositivi, utilizzati negli Stati Uniti, sono di difficile reperibilità in Italia. [4][5].
- ♦ Manutenzione: Le operazioni di manutenzioni di tipo predittiva possono aiutare a prevenire fenomeni di Arc

Flash. L'uso della termografia a tale proposito si rivela uno strumento eccellente per le verifiche sugli impianti, dalla quale si possono trarre importanti conclusioni mirate alle operazioni di manutenzione ed eventualmente di adeguamento degli impianti (carichi fortemente squilibrati, fenomeni di sovratemperatura all'interno dei quadri elettrici, sovraccarichi, ecc. ecc.).

CONCLUSIONI

L'articolo ha voluto porre la giusta attenzione ad un tipo di rischio elettrico la cui valutazione è del tutto trascurata nel nostro Paese. L'Arc Flash è un tipo di rischio inatteso che si verifica con estrema violenza e se dovesse investire un lavoratore che si trova nel suo raggio d'azione le conseguenze sarebbero quasi sicuramente mortali. Il lavoro presentato, espone i metodi di valutazione del rischio Arc Flash sviluppati negli U.S.A. i quali possono estendersi anche alle nostre realtà impiantistiche, adottando i parametri definiti nella nostra normativa tecnica in materia di lavori elettrici (CEI 11-27) e con i tempi di esposizione delle nostre protezioni.

Visto il vuoto normativo nazionale in materia, è un errore, a parere di chi scrive, riferirsi per la protezione dai lavori elettrici ai soli DPI indicati nella Norma CEI 11-27 Ed. 2014 come molti tecnici sostengono, ma tutte le indicazioni che se ne possono trarre sull'uso dei DPI appropriati all'arco elettrico, vanno interpretati come condizioni minime di sicurezza. Probabilmente l'uso della sola visiera e dei soli guanti isolanti non sono sufficienti a resistere ad energie radianti incidenti significative è per questo necessario e obbligatorio, prima di individuare i DPI da assegnare al personale addetto ai lavori elettrici, eseguire una seria valutazione del rischio Arc Flash.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. J. Spezia, "A Survey of Arc Flash Computation Methods and Mitigation Strategiesn," Journal of Industrial Technology. Volume 26, number 2, April 2010 through June 2010.
- [2] NFPA 70E-2012, "Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces", Copyright 2012, National Fire Protection Association.
- [3] IEEE Std 1584TM-2002, "Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculation", Institute of Electrical and Electronics Engineering, New York, NY.
- [4] C. Inshaw and R. A. Wilsonl, "Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation, Presented to Western Protective Relay Conference Spokane, WA, October 20th, 2004.
- [5] H. Picard (Eaton), J. Verstraten (Dow) and R. Luchtemberg (Nam/Shell), "Practical Approaches to Mitigating Arc Flash Exposure in Europe", Copyright Material PCIC Europe Paper No. IS-20.

IL RISCHIO ELETTRICO DOVUTO ALL'ARC FLASH

nei sistemi in corrente
continua



LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO ELETTRICO È UN OBBLIGO DI LEGGE E COME TALE DEVE ESSERE ESEGUITA IN TUTTE LE SUE FORME. LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO NON RIGUARDA LA CONFORMITÀ DELL'IMPIANTO, ANCHE SE L'IMPIANTO È REALIZZATO A REGOLA D'ARTE E REGOLARMENTE MANUTENUTO E VERIFICATO, I RISCHI RESIDUI SONO SEMPRE PRESENTI E COME TALI DEVONO ESSERE VALUTATI

Nell'articolo pubblicato su "L'Impianto Elettrico & Domotico" nel fascicolo di giugno 2013, dal titolo "Come valutare il rischio elettrico dovuto a flash arco" abbiamo trattato l'Arc Flash nei sistemi elettrici in corrente alternata, esponendo gli standard statunitensi del NFPA 70E e dell'IEEE 1584-2002, adattandoli alle normative europee vigenti in materia. Nell'ultimo decennio, abbiamo assistito nel nostro Paese e non solo, a una notevole implementazione di impianti fotovoltaici di piccola e grande potenza anche fino a qualche decina di MW. Tali sistemi, com'è noto, utilizzano pannelli al silicio che trasformano l'energia radiata dal sole in energia elettrica in corrente continua per poi essere convertita, tramite gli inverter, in corrente alternata.

In tali tipi di impianti i fenomeni di arc flash sono altamente probabili e dovuti a svariate cause, come ad esempio l'allentamento dei morsetti di collegamento del cavo principale di stringa nelle String Box (quadri di stringa), cortocircuito sul lato d.c., fenomeni di sovratemperatura per esposizione prolungata alle radiazioni solare, ecc.

Una volta che l'arco elettrico si è instaurato non è facile interromperlo visto che la corrente d'arco non attraversa l'asse dei tempi, e pertanto il rischio di incendio è altamente probabile, con gravi conseguenze sia per gli eventuali operatori sia, se l'impianto è installato sul tetto dell'edificio, per l'edificio stesso.

Anche per gli UPS e i soccorritori statici si possono verificare fenomeni di arc flash d.c. Per tali apparecchiature le operazioni di manutenzione al sistema batterie stazionarie impongono l'uso di procedure mirate e l'uso di DPI specifici in funzione dell'energia radiata dall'Arc flash.

Argomentazioni di questo tipo sono spesso sottovalutate in ambito di valutazione dei rischi, oppure neanche presi in considerazione nonostante l'art. 80 del D.L. 81/2008 lo imponga.

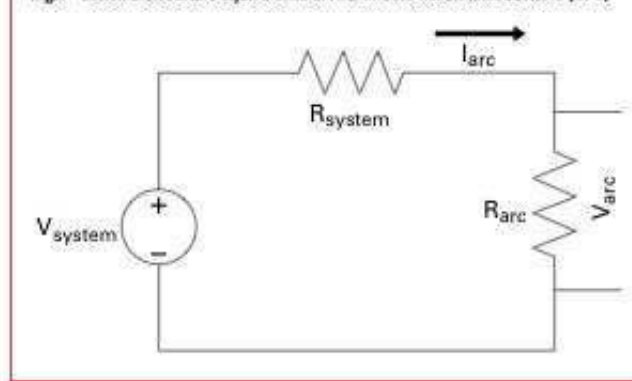
L'edizione gennaio 2014 della Norma CEI 11-27 in materia di lavori elettrici, più volte cita le precauzioni che devono prendere gli operatori in caso si dovesse verificare un arco elettrico ma nessuna norma nazionale ci dice come quantificare l'effetto dell'arco elettrico in termini energetici se non ricorrere agli standard statunitensi.

Un operatore investito dall'arco elettrico in corrente continua, risulta essere sottoposto a temperature elevatissime (si possono raggiungere temperature fino a 35.000 °C), onde ad alta pressione, espulsione di materiale fuso a velocità di circa 1600 km/h con l'alta probabilità di perforare il corpo umano e qualsiasi cosa si trovi nelle vicinanze e la conseguente formazione di incendi se il materiale colpito è combustibile. Le conseguenze sugli operatori che riescono a sopravvivere a questo fenomeno sono: gravi ustioni, perdita dell'udito, cecità, gravi menomazioni fisiche.

Tab. 1 Le categoria di rischio e le categoria di DPI (Dispositivi di Protezione Individuali) associati

Valore dell'Energia radiante E_c calcolata in [cal/cm ²]	Categoria di Rischio	Categoria DPI
$0 < E_c \leq 1,5$	0	0
$5 < E_c \leq 8$	1	1
$8 < E_c \leq 25$	2	2
$25 < E_c \leq 40$	3	3
$E_c > 40$	4	4

Fig.1 - Schema circuitale equivalente di riferimento nei sistemi batteria (UPS)



Per quanto riguarda l'analisi dell'Arc Flash nei sistemi elettrici in corrente continua, nel 2012 l'NFPA-70E ha incluso, all'interno dello standard, delle tabelle per la scelta dei dispositivi di protezione individuali in funzione dei range di tensione per i lavori elettrici col limite di tensione in corrente continua di 600 V. I calcoli si riferiscono alla durata dell'arco di 2 secondi e alla distanza di lavoro 45,72 cm (18").

Lo standard NFPA 70E ha fornito alcune indicazioni per la valutazione dell'arc-flash d.c. focalizzando principalmente l'attenzione sulla manutenzione delle batterie stazionarie fino a tensioni di 600 V.

La scala di riferimento delle energie radiante in caso di arc flash d.c. rimane la solita per la valutazione dell'arc flash in corrente alternata e cioè l'NFPA-70E.

Lo scopo della valutazione è quello di calcolare l'energia radiante emessa dall'arc flash e di confrontarla con la tabella 1, la quale fornisce la categoria di rischio e la categoria di DPI (Dispositivi di Protezione Individuali) associati.

Lo standard IEEE 1584, anche se quello maggiormente utilizzato per la valutazione dell'arc flash in corrente alternata, in corrente continua non fornisce alcuna indicazione.

Lo standard di riferimento per la valutazione in d.c. rimane pertanto lo standard NFPA-70E.

Approccio alla valutazione del rischio elettrico da arc flash in corrente continua secondo NFPA-70E

I metodi oggi conosciuti per la valutazione dell'arc flash in corrente continua sono fondamentalmente due:

- 1) Metodo della massima potenza dovuto a Daniel Doan (2007), il quale presuppone che la massima potenza per un arc flash si ha quando la tensione d'arco si riduce al 50% della tensione di alimentazione;
- 2) Metodo di Ammerman (2009) di tipo empirico che determina l'energia radiata attraverso il calcolo della resistenza d'arco e della corrente d'arco.

Comunque sia, i due metodi riconoscono che la distribuzione dell'energia specifica radiata in aria è di tipo sferica, la cui espressione risulta:

Tab.2 Esempio di calcolo

Tipo di Batterie	Grande UPS, costituito da batterie stazionarie al piombo
Numero di dischi	35
Corrente di cortocircuito	31 kA
Numero di celle	240
Tensione a circuito aperto	2,10 V
Resistenza interna batteria	68 μW

$$E_s = \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) \text{ espressa in [J/cm}^2] \quad (1)$$

dove P_{arc} è la massima potenza sprigionata dall'arco ed espressa in [W], t_{exp} è il tempo di esposizione all'arco (tempo di durata dell'arco) espresso in [s] e D è la distanza di lavoro cioè la distanza a cui si trova l'operatore dal punto attivo in cui si verifica l'arco espressa in [cm].

Esprimendo la P_{arc} in [kW] e sapendo che $1J=0,239 \text{ cal}$, possiamo scrivere:

$$E_s = \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) (0,239 \cdot 1000) = 19,02 \cdot \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{D^2} \right) \text{ espressa in [cal/cm}^2] \quad (2)$$

I risultati ottenuti dalla (2) vanno confrontati con gli intervalli di valori della tabella 1 per la valutazione del rischio dovuto ad arc flash. L'espressione (2) rappresenta l'energia specifica irradiata in aria libera ed espressa in [cal/cm²].

L'energia specifica irradiata all'interno di una struttura chiusa, come potrebbe essere un quadro elettrico, un inverter, una string box, una cassetta ecc., ecc., può essere calcolata dall'espressione precedente semplicemente moltiplicando la (2) per il fattore 3, per indicare che in una struttura chiusa almeno tre lati sono vincolati e quindi si ha:

$$E_{scat} = 3 \cdot \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \right) (0,239 \cdot 1000) = 57,08 \cdot \left(\frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{D^2} \right) \text{ espressa in [cal/cm}^2] \quad (3)$$

Tab.3 Risultati di analisi arc flash

Nodo di valutazione Arc Flash	Distanza di valutazione (D) in [cm] (Dv CEI 11-27)	t_{exp} [s]	P_{arc} [kW]	E_s [cal/cm ²] In aria	Categoria Rischio	Energia Irradiata In Box [cal/cm ²]	Categoria Rischio
Nodo 1 (D.C.)	30	2	6	0,38	0	1,14	0
Nodo 2 (D.C.)	30	2	72	2,88	2	8,64	3
Nodo 3 (A.C.)	30	0,2	432	7,39	2	28,50	4
Nodo 4 (A.C.)	30	0,2		7,39	2	28,50	4
Nodo 5 (A.C.)	30	0,2	900	8,9 (Metodo di LEE)	3		

Arc flash nei sistemi batteria (UPS) – Metodo di Doan e Metodo di Ammerman

Il sistema al quale dobbiamo fare riferimento è rappresentato dallo schema circuitale equivalente di figura 1, dove V_{system} rappresenta la tensione a vuoto equivalente vista dal nodo di guasto (punto attivo dove si verifica l'arco, R_{system} è la resistenza equivalente in corrente continua vista dal nodo di guasto e calcolata secondo il Principio di Thevenin e include cavi connettori e celle, mentre R_{arc} esprime la resistenza d'arco.

Poiché la potenza nei sistemi in corrente continua è data dalla semplice espressione:

$$P = V_{d.c.} \cdot I_{d.c.} \quad (4)$$

In condizioni d'arco possiamo scrivere:

$$P_{arc} = V_{arc} \cdot I_{arc} = R_{arc} \cdot I_{arc}^2 \quad (5)$$

E quindi in termini di energia:

$$E_{arc} = R_{arc} \cdot I_{arc}^2 \cdot t_{exp} \quad [J] \quad (6)$$

la cui energia specifica irradiata in aria:

$$E_s = \frac{P_{arc} \cdot t_{exp}}{4\pi D^2} \quad [J/cm^2] \quad (7)$$

Lo standard NFPA-70E Annesso D, propone un metodo per calcolare I_{arc} in relazione alla corrente di cortocircuito I_{sc} :

$$I_{arc} = 0,5 \cdot I_{sc} \quad (8)$$

Sostituendo le espressioni trovate, ed esprimendo l'energia specifica irradiata in cal/cm² si ha:

$$E_{scat} = 0,239 \cdot I_{arc} \cdot V_{system} \cdot \frac{t_{exp}}{4\pi D^2} = 0,02 \cdot I_{sc} \cdot V_{system} \cdot \frac{t_{exp}}{D^2} \quad [cal/cm^2] \quad (9)$$

Il Metodo di Ammerman, sempre mantenendo le validità del circuito di figura precedente, ci consente di calcolare la resistenza d'arco e la corrente d'arco attraverso le relazioni:

$$R_{arc} = \frac{20 + 0,534 \cdot l}{l_{arc}^{0,88}} \quad I_{arc} = \frac{V_{system}}{R_{system} + R_{arc}} \quad (10)$$

dove l_g è la distanza del gap in mm che varia da 12,7 mm a 558,8 mm.

Una volta determinate la resistenza d'arco e la corrente d'arco mediante le relazioni precedenti, l'energia specifica radiata è calcolata attraverso la (9).

Consideriamo come distanza di prossimità D_v dal nodo attivo pari 30 cm (CEI 11-27 – Lavoro elettrico in prossimità) e un tempo di esposizione di 2 s.

Applicando le relazioni (8) e (9) si ha:

$$E_{s,calc} = 0,239 \cdot I_{arc} \cdot V_{system} \cdot \frac{t_{exp}}{4\pi D^2} = 0,02 \cdot I_{arc} \cdot V_{system} \cdot \frac{t_{exp}}{D^2} \quad (11)$$

$$E_{s,calc} = 0,02 \cdot 15.500 \cdot 240 \cdot 2,10 \cdot \frac{2}{30^2} = 347,2 \quad [\text{cal/cm}^2] \quad (12)$$

che confrontandola con la tabella 1 ci porta ad avere un rischio elettrico dovuto ad Arc Flash d.c. di tipo 4 e DPI in categoria 4. Un tempo di esposizione dell'ordine dei secondi risulta fatale per l'operatore. Riducendo il tempo a 0,1 s a parità di distanza, l'energia specifica radiata si riduce a 17,36 [cal/cm²] riportando la categoria di rischio a 2 del tutto accettabile, così come risulta accettabile anche la categoria di DPI associata.

Arc flash negli impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica

Per gli impianti fotovoltaici lo standard NFPA 70E Annesso D,

propone un metodo per calcolare I_{arc} in relazione alla corrente di cortocircuito standard del pannello fotovoltaico I_{sc} :

$$I_{arc} = I_{cc} = 1,25 \cdot I_{sc} \quad (13)$$

Tale relazione è la stessa di quella proposta nella Norma 82-25. Poiché vi è correlazione diretta tra potenza e corrente, possiamo scrivere:

$$P_{arc} = 1,25 \cdot P_{n,max} \quad (14)$$

Per la valutazione dell'arc flash di impianti fotovoltaici è necessario quindi calcolare le correnti di cortocircuiti nei vari punti di valutazione.

Determinate tutte le potenze d'arco e applicando ripetutamente la (9) si determina l'energia specifica radiata nei punti di valutazione.

A titolo di esempio esaminiamo un sottocampo fotovoltaico di circa 1 MW di un impianto FV di produzione di energia elettrica della potenza complessiva di picco di 10 MW.

Il sottocampo è costituito da 3 inverter da 330 kW, di pannelli fotovoltaici tipo Canadian Solar CS6P 240W con $I_{sc}=8,59$ e di un trasformatore elevatore. Ogni inverter è costituito da 6 cassette della potenza di 55 kW per una potenza totale di 330 kW e ogni string box connessa ad ogni cassetto dell'inverter è costituita da 12 stringe di pannelli fotovoltaici.

La tabella 3 riassume i dati di calcolo sulla sezione 1 MW e nei vari punti di valutazione per l'energia radiata in condizioni di arc flash. Per l'impianto FV vanno applicate le relazioni inerenti non solo all'Arc Flash D.C. ma anche all'Arc. Flash A.C. sul sistema in corrente alternata.





SICUREZZA

Rischio elettrico da Arc Flash

Pietro Antonio Scarpino

Come individuarlo, valutarlo e mitigarlo