

STRIMERUL ȘI LIDERUL

O analiză comparativă

Acad. Gleb DRĂGAN¹

gleb_dragan@yahoo.com

ABSTRACT: The *streamer* and the *leader* – two basic components of a complete electric discharge – have certain common features. For instance, they both form a plasma channel with specific temperatures and characteristics. The temperature of the plasma channel formed by the streamer is low, in contrast with the plasma channel formed by the leader, whose temperature reaches thousands of degrees Kelvin. Furthermore, the plasma channel formed by the leader is surrounded by a spatial electric charge of similar polarity with the spatial electric charge remaining in the streamer area after the propagation of the electrons towards the end of the leader's channel. In the air, a leader cannot appear and develop in the absence of a streamer. Thus, it is wondrous how nature has developed the means to create these two processes – the streamer and the leader – that generate a complete electric discharge, i.e. the lightning.

KEYWORDS: complete electric discharge, streamer, leader, plasma channel

Introducere

Coordonarea izolației se bazează, după cum se știe, pe determinarea solicitărilor electrice și pe cunoașterea tensiunilor de descărcare, a fenomenologiei procesului de descărcare. Izolația care intervine cel mai frecvent este izolația de gaze, în mod concret – aerul. Orice descărcare electrică dintre doi electrozi în aer este condiționată de apariția *strimerilor* și de dezvoltarea unui *lider*. Pentru analiza acestor două formațiuni se vor considera condiții normale ale aerului: $T_0 = 20^0$ C = 297 K, $p_0 = 760$ mm col. Hg = $0,1013 \cdot 10^6$ Pa și concentrația particulelor $N = N_0 = 2,67 \cdot 10^{19}$ cm⁻³.

Intensitatea câmpului, la care încep procesele de ionizare este $E = 30$ kV/cm. Distanța dintre electrozi depășește câțiva cm, câmpul

¹ Președinte al Secției de Științe Tehnice al Academiei Române; președinte al Diviziei de Istoria Științei a CRIFST al Academiei Române.

nefiind uniform; în acest caz mecanismul de bază care duce la apariția de noi electroni este fotoionizarea spațială. De menționat că H. Raether a arătat, pentru prima dată în 1930, rolul preponderent al fotoionizărilor, cu toate că nu există nici astăzi o părere unică asupra fenomenologiei intervenției acestor fotoni. În condițiile menționate, dacă $N_e > 10^{16} \div 10^7 \text{ cm}^{-3}$, se asigură autonomia descărcării. În ipoteza unui câmp neuniform, descărcarea autonomă este exprimată printr-o succesiune de avalanșe localizate în jurul electrozului de zonă de câmp electric intens. Această formă a descărcării reprezintă, după cum se știe, *descărcarea corona*.

Descărcarea corona este, de regulă, de lungime mai mică decât distanța dintre electrozi. Pentru a avea loc străpungerea intervalului este necesar ca procesele de ionizare să aibă loc în tot intervalul dintre electrozi. Această stare este posibilă prin formarea unui canal de plasmă, cuprinzând un număr determinat de electroni.

O dată cu dezvoltarea avalanșei, datorită difuziei electronilor, la o anumită valoare a intensității câmpului electric sunt îndeplinite condițiile necesare prin care gazul ionizat trece din avalanșă în starea de plasmă. Relațiile care intervin în acest sens sunt relativ simple.

Raza avalanșei este dată de procesul difuziei:

$$r_{av} = \sqrt{4D_e t}, \quad (1)$$

unde D_e reprezintă coeficientul de difuzie.

Concentrația electronilor în avalanșă, conform relației lui Raether este:

$$N_e = \frac{\int_0^x (\alpha - \eta) dx}{\frac{4}{3} \pi r_{av}^3}, \quad (2)$$

Unde α este factorul spațial de ionizare, iar η este factorul de atașare.

Cu relațiile menționate se poate determina concentrația electronilor în avalanșă, raza avalanșei și intensitatea locală a câmpului electric. Calculele efectuate arată că după $10^{-8} - 10^{-7}$ s, raza avalanșei devine $r_{av} = 10^{-2}$ cm, iar concentrația electronilor $N_e = 10_{12} \div 10^{13} \text{ cm}^{-3}$,

lungimea avalanșei fiind $l_{av} \approx 10^{-3}$ cm. În aceste condiții, este asigurată dezvoltarea avalanșelor.

În cazul zonelor de câmp electric deosebit de neuniform, structura de plasmă se dezvoltă până în zona de câmp mai puțin intens numai sub forma unui canal îngust. Acest canal de plasmă a primit denumirea de *strimer*. În gaze, *liderul* apare ca urmare a formării strimerilor.

Strimerul și liderul – considerații generale

Între aceste două formațiuni există mai multe elemente comune, dar și deosebiri. Iată de ce prezintă interes o analiză comparativă între strimer și lider.

Atât strimerul, cât și liderul se caracterizează printr-un canal umplut cu plasmă. Dezvoltarea unui lider are drept consecință creșterea intensității câmpului electric, ceea ce se constată și la dezvoltarea strimerului. Conductibilitatea relativ mare a canalului liderului favorizează dezvoltarea acestuia. De menționat că și conductibilitatea canalului strimerului este importantă, iar concentrația electronilor în cazul strimerului poate fi mai mare ca cea din cazul liderului. Deosebirea de bază dintre cele două formațiuni constă în dinamica schimării lor în timp. Timpul necesar reducerii conductibilității unui strimer este de 10^{-7} s. În cazul liderului, conductibilitatea se menține circa $10^{-3} \div 10^{-2}$, iar intensitatea câmpului electric $E < 5$ kV/cm.

O cunoaștere mai profundă a strimerului, respectiv a liderului, impune o analiză teoretică completată de încercări experimentale. Analiza teoretică a acestor formațiuni se bazează pe modelarea lor. La modelare se iau în considerare criteriile următoarelor procese:

- analiza fenomenelor înainte de apariția canalului de plasmă;
- viteza de formare și caracteristicile plasmei;
- analiza proceselor din canalul de plasmă;
- modul de dezvoltare a câmpului electric de la capătul strimerului, respectiv al liderului.

Strimerul și liderul au constituit obiectul studiilor multor cercetători, dintre care menționez pe: H. Raether, J. M. Meek, J. D. Graggs, A. Engel, N. E. Kaptov, A. Petersen, R. T. Waters, I. S. Stekolnicov, E. Marode, E. M. Bazelian, I. Gallimberti.

Analiza teoretică și modelarea strimerului sau a liderului se bazează pe ecuațiile cinetice ale lui Boltzman. Dar această modalitate de soluționare a proceselor nestaționare, caracteristice descărcărilor electrice, necesită soluționarea ecuațiilor la fiecare valoare

momentană a timpului, dată fiind variația extrem de rapidă a diferitelor procese. Pentru exemplificare se vor menționa categorii de procese în funcție de timpul de evoluție al acestora. Un proces relativ rapid se referă la variația concentrației purtătorilor de sarcină și la procesele de excitație de ordinul 10^{-7} s. Cele mai lente procese sunt procesele privind încălzirea gazului sau procesul de difuzie, de ordinul 10^{-5} s.

În procesele de ionizare se ajunge la un regim cvasistaționar, în caul în care raportul dintre intensitatea câmpului electric este, local, practic constantă.

Această situație apare în cazul strimerului. Schimbarea parametrilor unui lider depinde de gradul de încălzire locală a gazului.

În volumul I al tratatului de *Tehnica tensiunilor înalte* am prezentat modele ale strimerului, respectiv ale liderului, elaborate de Gallimberti, de Bazelian, de Hutzler (în cazul liderului), așa că nu voi insista asupra aspectelor teoretice ale acestor două formațiuni.

O analiză comparativă între strimer și lider este posibilă numai dacă se cunoaște fenomenologia acestor două formațiuni.

Strimerul

Se presupune că distanța dintre doi electrozi este suficient de mare. În aceste condiții poate să ia naștere și liderul. De asemenea, câmpul electric dintre cei doi electrozi se consideră puternic neuniform. Această stare apare frecvent în practică, de exemplu, în cazul electrozilor *vârf - placă*. Un electrod va avea la capătul său o zonă de câmp intens, determinat de sarcinile sale electrice; situația este similară dacă în locul unui electrod considerăm un canal de plasmă. Zona la care intensitatea câmpului este maximă reprezintă capul plamei. Această stare se datorează unui curent care transferă sarcina pozitivă la capătul canalului de plasmă; acest transfer se face în realitate prin deplasarea electronilor, mobilitatea ionilor fiind redusă. În Fig. nr. 1 se arată starea care se crează pentru o poziție dată a canalului de plasmă. De remarcat variația intensității câmpului electric, ca și variația concentrației electronilor; la capătul canalului se observă concentrația rezultantă a purtătorilor de sarcină.

În zonele de câmp intens din fața capului au loc procese de ionizare prin ciocnire. Apariția electronilor se datorează, în mare parte, fotonilor care apar în urma proceselor de excitație a moleculelor de N_2 . Cuantele eliberate ionizează moleculele de O_2 . La distanța de 0,1 cm apar $N_e = 10^5 \div 10^6 \text{ cm}^{-3}$. Fiecare dintre acești electroni capătă, sub acțiunea câmpului electric, energie suficientă pentru crearea unei

avalanșe. Cum avalanșele se formează, practic, simultan, ele umplu spațiul din jurul capului, formând un nou domeniu al plasmei. Datorită deplasării electronilor în direcția anodului, apare la capătul canalului o acumulare de sarcini pozitive, care crează condiții pentru continuarea procesului de dezvoltare a strimerului.

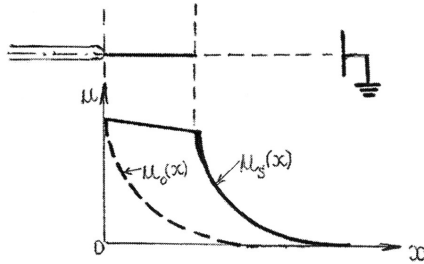


Fig. nr. 1

Dacă lungimea strimerului l_s este mult mai mare decât raza capului r_c ($l_s \gg r_c$), canalul se deplasează pe o distanță echivalentă cu câteva raze ale capului. Se poate considera că avem deplasarea, practic fără deformări, a unei de câmp intens, conform ecuației:

$$E(x, t) = E(x - v_s t), \tag{3}$$

Unde v_s reprezintă viteza de deplasare a strimerului.

Se poate afirma că are loc o deplasare a unei de ionizare, ionizare care are loc în capul strimerului.

Parametrii unei de ionizare v_s ; E_m și r_c depind de valoarea potențialului U_c care este egală cu potențialul U_a al anodului, minus căderea de tensiune în canalul strimerului.

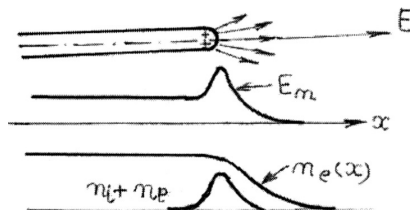


Fig. nr. 2

În Fig. nr. 2 este reprezentată variația potențialului $u_s(x)$, în prezența strimerului și a potențialului $u_0(x)$ în lipsa strimerului.

Viteza strimerului depinde de potențialul capului său. Această viteză este mai mică decât viteza derivei electronilor, a cărei valoare este $v_e(E_c)x \cdot 4 \cdot 10^7$ cm/s, pentru $U_c = 5 \div 8$ kV. Pentru determinarea distanței de propagare a strimerului, trebuie să se cunoască concentrația electronilor în plasmă, precum și curentul în canalul acestuia. Pe această bază, se poate calcula pierderea de tensiune și, în consecință, valoarea potențialului capului strimerului. Strimerul are o plasmă având o densitate relativ ridicată, pentru a putea transmite sarcini la distanță suficientă, astfel încât, la capul strimerului intensitatea câmpului să îndeplinească condițiile necesare ionizărilor. În unele cazuri, se poate ca strimerul să ajungă până la electrodul opus. În realitate, liderul pilot, caracteristic descărcărilor sub formă de trăsnet este un strimer lung, având un proces de propagare continuu.

Liderul

Temperatura canalului unui strimer este relativ scăzută, iar intensitatea câmpului electric E într-un câmp neuniform nu este suficientă pentru dezvoltarea procesului. Totodată, numărul electronilor din plasmă scade din cauza recombinațiilor și a atașării electronilor de particule neutre. Din aceste considerente, de regulă, un strimer nu se propagă până la electrodul opus. De altfel, un strimer nu contribuie, prin însăși structura sa, la creșterea intensității câmpului electric de-a lungul canalului plasmei. Pe de altă parte, creșterea intensității câmpului electric duce la creșterea razei canalului și reducerea concentrației electronilor și, ca urmare, la scăderea intensității curentului.

Pentru dezvoltarea descărcării apare o structură mai complexă, liderul, caracterizat de un canal de plasmă care este înconjurat de un înveliș de sarcini electrice. Sarcina spațială din jurul liderului, ca și aceea din zona strimerului, este de aceeași polaritate. Această repartiție spațială a sarcinilor electrice duce la micșorarea intensității câmpului electric, îndeosebi în zona strimerului. După cum s-a menționat, pentru dezvoltarea strimerului este necesar ca intensitatea locală a câmpului electric să fie $E_s \approx 5$ kV/cm. Învelișul de sarcini electrice din jurul canalului de plasmă are ca efect creșterea capacității lineice a liderului și, prin aceasta, creșterea energiei induse. Totodată, diametrul redus al canalului liderului favorizează încălzirea acestuia.

Conductibilitatea canalului fiind suficient de mare, intensitatea câmpului electric la capul acestuia creează condiții pentru apariția proceselor de ionizare. Apar strimeri, iar curentul electric al tuturor

strimerilor se propagă în direcția capului. Această contribuție a curenților, dată de deplasarea electronilor tuturor strimerilor, duce la formarea plasmă pe o lungime egală cu aproximativ diametrul capului liderului și, în consecință, alungirea liderului cu această distanță.

Valoarea acestui curent se poate determina luând în considerare sarcina unui strimer și frecvența lor de apariție.

$$i_c = q_s \cdot v_s. \quad (4)$$

Pentru $q_s = 10^{-9}$ C și $v_s = 10^9$ s⁻¹ se obține $i \approx 1$ A.

Alungirea strimerului are loc în perioada de instabilitate τ_{ns} determinat de timpul de dezvoltare al strimerilor, care se face cu viteza $v_s = 10^7$ cm/s și de timpul privind durata lor, care este de 10^{-5} s. Perioada de instabilitate este $\tau_{ns} = 10^{-6}$ s, lungimea liderului fiind de circa 1 cm, rezultă viteza:

$$v_l \approx \frac{\tau_{ns}}{1} \approx 10^6 \text{ cm/s}. \quad (5)$$

În condițiile de laborator, valoarea curentului este de circa 1 A iar viteza liderului $v_l = 1,5 \div 2$ cm/s. Acest timp este îndeajuns de mare pentru ca în canalul liderului să aibă loc procese tranzitorii de relaxare și, ca urmare, starea canalului să se apropie de cea staționară. Temperatura canalului atinge 5.000–6.000 K.

Conform datelor prezentate în *Electra*, nr. 53 din 1977, bazate pe numeroase încercări experimentale, viteza liderului se poate determina cu relația empirică:

$$\log V_{L_{ax}} = 5 + \log A_u, \quad (6)$$

unde $V_{L_{ax}}$ este exprimată în cm/s, iar A_u este frontul undelor, exprimat în kV/μs.

Viteza liderului, conform acestei relații este cuprinsă între limitele $(1,2 \div 2) 10^6$ cm/s.

Prezentarea – succintă – pe care am făcut-o se referă la dezvoltarea descărcării în gaze. În cazul unui mediu difuz, formarea liderului are alte premize, ceea ce face ca descărcarea electrică să difere. Dacă în cazul descărcării în gaze, curentul electric apare ca urmare a apariției strimerilor într-un mediu difuz, curentul se propagă de-a lungul canalului de plasmă direct de la electrodul supus unui potențial. Rezultă că la o descărcare în mediu difuz,

concret – în sol, dezvoltarea liderului se face în lipsa strimerilor. În gaze, pentru apariția strimerului, tensiunea aplicată electrozudului este în jur de 1.300 kV; într-un mediu difuz este suficientă o tensiune cu mult mai mică. În procesul de propagare a undei de ionizare într-un mediu difuz, parametrii lineici care trebuie luați în considerare sunt: *rezistența* R și *conductibilitatea* G . Situațiile menționate sunt caracteristice prizelor de pământ. Într-o primă aproximație, coeficientul de difuzie fiind exprimat prin:

$$X = \frac{1}{R \times G} \approx \frac{2\delta}{\mu_0}, \quad (7)$$

Unde δ reprezintă rezistivitatea solului, iar μ_0 reprezintă permitivitatea aerului, rezultă valoarea acestui coeficient $X = 150 \div 1.500 \text{ m}^2/\mu\text{s}$, în funcție de rezistivitatea solului.

Concluzii

Strimerul și liderul, formațiuni de bază pentru asigurarea unei descărcări electrice complete, au – în parte – elemente comune. Un element comun important îl constituie faptul că ambele formațiuni se caracterizează printr-un canal de plasmă. Diferența constă în temperatura acestui canal și, în mod implicit, în caracteristicile acestuia. În cazul strimerului se poate afirma că plasma este rece, temperatura acesteia fiind relativ mică, spre deosebire de temperatura plasmei canalului unui lider, care atinge mii de grade K. Pe de altă parte, canalul de plasmă al liderului este înconjurat de sarcini spațiale de aceeași polaritate cu polaritatea sarcinilor spațiale rămase în zona strimerilor în urma propagării electronilor spre capul canalului liderului. În gaze, implicit în aer, nu se poate concepe apariția și dezvoltarea unui lider, premiza unei descărcări electrice, fără apariția strimerilor. Este fascinant cum natura a găsit mijloace de a crea procese, respectiv strimerul și liderul, care să ducă la producerea unei descărcări complete, respectiv la producerea *trăsnetului*.