

Władysław OPYDO*
Grzegorz TWARDOSZ**
Jadwiga OPYDO**

KONCEPCJA ELEKTROCHEMICZNEJ OCHRONY PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGÓW NAPIĘCIOWĄ FALĄ WĘDROWNĄ

Praca przedstawia koncepcję ochrony elektrochemicznej przed korozją rurociągów i kabli napięciowymi falami wędrownymi wytworzonymi w chronionej konstrukcji przez impulsowe źródło napięcia. Pojedynczy impuls napięciowy przemieszcza się w rurociągu lub opancerzeniu kabla w postaci napięciowej fali wędrownej, która po dotarciu do jego nieuziemionego końca, ulega odbiciu, nie zmieniając swojej biegunowości. Odbita część fali napięciowej dodaje się do części fali przychodzącej zwiększając tym samym polaryzację końcowej części chronionej konstrukcji. W ten sposób polaryzacja konstrukcji impulsowym źródłem napięcia stwarza możliwość zwiększenia długości odcinka chronionej konstrukcji, który może być skutecznie chroniony przed korozją przy zasilaniu ochrony z jednego źródła.

SŁOWA KLUCZOWE: ochrona elektrochemiczna przed korozją, ochrona katodowa, ochrona anodowa, fala napięciowa

1. WPROWADZENIE

W środowiskach zawierających wodę korozja metali i stopów ma charakter elektrochemiczny. Dlatego do ochrony metali przed korozją stosuje się metody polegające na zmianie ich potencjałów elektrodowych, co zapobiega rozpuszczaniu metalu lub proces ten znacznie ogranicza. W zależności od kierunku przesuwania potencjału elektrodowego metody te dzielą się na metody ochrony katodowej, polegające na zmniejszeniu wartości potencjału metalu i metody ochrony anodowej, polegające na zwiększaniu potencjału.

O zachowaniu się określonego metalu, lub stopu, w roztworze wodnym można dowiedzieć się z opracowanego dla danego materiału wykresu Pourbaix [4, 5]. Wykresy Pourbaix zostały sporządzone dla najczęściej stosowanych metali i stopów. Przedstawiają one zależność potencjału elektrodowego metalu od

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

** Politechnika Poznańska.

pH roztworu, w którym ten metal się znajduje i wskazują, czy w danych warunkach metal ulega korozji, czy też jest na nią odporny, bo znajduje się w stanie termodynamicznie trwałym lub w stanie pasywnym. Z wykresu Pourbaix można określić kryterium potencjałowe skutecznej ochrony przed korozją, czyli wartość potencjału elektrodowego, którą musi mieć metal by przy określonym pH środowiska, był chroniony przed korozją. Ta odczytana wartość, a właściwie przedział tej wartości, przy której metal jest odporny na korozję, jest ujemna przy założeniu wykorzystania polaryzacji katodowej (ochrona katodowa), lub dodatnia określająca, przy jakiej wartości potencjału dany metal, wskutek polaryzacji anodowej (ochrona anodowa), przechodzi do stanu pasywności, w którym to, np. w przypadku żelaza, fazą trwałą termodynamicznie jest tlenek żelaza, tworzący dobrze przylegającą, półprzewodzącą warstwę na powierzchni, chroniącą metal przed korozją.

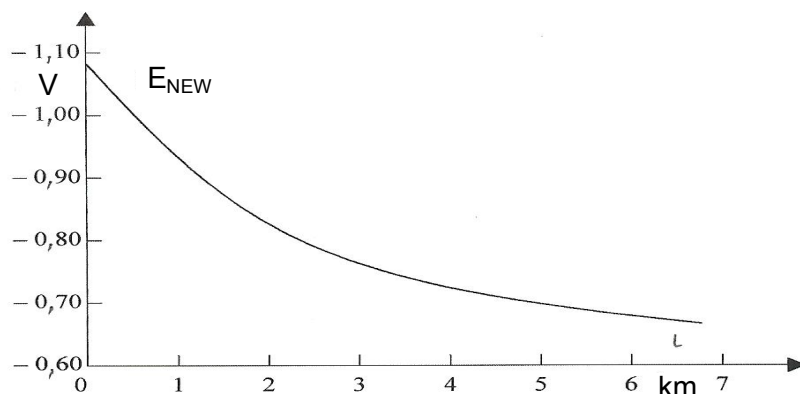
Historycznie wcześniejszą i częściej stosowaną metodą jest ochrona katodowa. Tę metodę, z wykorzystaniem do polaryzacji katodowej chronionej konstrukcji prądu stałego, z zewnętrznego regulowanego źródła napięcia, stosuje się najczęściej do ochrony rurociągów stalowych, kabli telekomunikacyjnych i elektroenergetycznych. W utworzonym ogniwie elektrolitycznym chroniona konstrukcja, połączona z ujemnym zaciskiem źródła, jest katodą. Natomiast, dodatni zacisk źródła łączony jest z pomocniczą anodą zakopaną w ziemi. Anody wykonuje się z materiałów roztwarzalnych podczas przepływu prądu, takich jak stal lub trudno roztwarzalnych, takich jak żeliwo, grafit.

Rurociągi i kable można też chronić przed korozją elektrochemiczną stosując ochroną anodową zasilaną prądem stałym ze źródła zewnętrznego. W tym przypadku dodatni zacisk źródła łączy się z chronioną konstrukcją, a ujemny z pomocniczą katodą. Jednak metoda ta jest rzadko stosowana.

Obecnie stosowane rozwiązania ochrony katodowej (lub anodowej) przed korozją metalowych konstrukcji wzdłużnych polegają najczęściej na polaryzacji konstrukcji ze źródła napięcia stałego lub czasami impulsowego. Przy projektowaniu ochrony należy zapewnić w miarę równomierny rozdział prądu ochrony na chronionej konstrukcji, a tym samym równomierny rozkład potencjału na jej powierzchni. Praktycznie jednak uzyskanie równomiernego rozdziału jest bardzo trudne i największe gęstości prądu występują w miejscach położonych w pobliżu anody, przy ochronie katodowej i w pobliżu katody, przy ochronie anodowej. W miarę oddalania się od tych elektrod pomocniczych i źródeł zasilania ochrony, wskutek upływu prądu przez izolację konstrukcji, jej potencjał ulega zmianie i w pewnej odległości jest już większy od górnej granicy przedziału skutecznej ochrony katodowej (rys. 1) lub mniejszy od dolnej granicy przedziału skutecznej ochrony anodowej. Wtedy te ochrony elektrochemiczne stają się nieskuteczne.

Zwiększenie zasięgu skutecznej ochrony przez wzrost napięcia źródła zasilającego ochronę ma ograniczenia wynikające z możliwości pojawienia się tzw.

przechronienia części konstrukcji. Wtedy ochrona elektrochemiczna części konstrukcji staje się nieskuteczna, gdyż ta część ma potencjał niższy od wartości potencjału z przedział potencjału skutecznej ochrony (w przypadku ochrony katodowej) lub wyższy (w przypadku ochrony anodowej).



Rys. 1. Typowe zmiany wartości potencjału elektrochemicznego (przeliczone względem potencjału normalnej elektrody wodorowej) rurociągu chronionego katodowo ze źródła prądu stałego i anodzie pomocniczej zlokalizowanych na początku rurociągu

Zwiększenie długości chronionego rurociągu, kabla, lub jego wyizolowanego elektrycznie od reszty konstrukcji odcinka, przy zasilaniu ochrony z jednego źródła, można uzyskać stosując elektroimpulsową ochronę przed korozją wędrówną falą napięciową [3]. Zasada działania tej ochrony polega na polaryzowaniu chronionego rurociągu lub kabla impulsami napięciowymi, które rozchodzą się wzdłuż chronionej konstrukcji w postaci wędrównej fali napięciowej, jak w linii elektrycznej długiej [1, 2] – impuls napięcia przemieszcza się w stronę końca konstrukcji, jako fala napięciowa, powodując jej polaryzację. Po dotarciu do końca konstrukcji, jeśli koniec ten jest nieziemionym, wyizolowanym od ziemi, fala napięciowa obija się od niego bez zmiany swojej biegunowości, po czym powraca w stronę źródła. Część odbitej fali dodaje się do części fali przychodzącej, przemieszczającej się jeszcze w stronę końca konstrukcji. Powoduje to zwiększenie stopnia polaryzacji konstrukcji, bo konstrukcja jest polaryzowana elektrochemicznie falą napięciową będącą sumą fali przychodzącej i fali odbitej.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

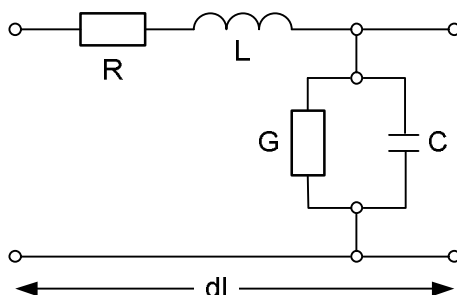
Chroniony elektrochemicznie przed korozją, odizolowany od ziemi rurociąg lub pancierz kabla jest obwodem elektrycznym ziemnopowrotnym. Z punktu widzenia elektrotechniki jest to dwuprzewodowa linia długa [1, 2] Na schemacie zastępczym elementarnego odcinka tej linii (rys. 2): R jest rezystancją zastępczą

szeregowego połączenia rezystancji jednostkowej chronionej konstrukcji oraz rezystancji jednostkowej obwodu ziemnopowrotnego, L jest indukcyjnością zastępczą szeregowego połączenia indukcyjności jednostkowej konstrukcji i indukcyjności jednostkowej obwodu ziemnopowrotnego, C jest pojemnością jednostkową konstrukcji w stosunku do ziemi, a G jest upływnością jednostkową doziemną jej izolacji.

Jeśli chroniona konstrukcja, będąca linią długą, zostanie włączona do źródła napięcia, to musi upłynąć pewien czas do chwili gdy fale napięcia i prądu dotrą do jej końca. Prędkość tych fal zależy od R , L , G i C linii. W przypadku gdy R i G będą równe zero to taka linia długa nazywa się linią bezstratną. Wtedy wyrażenie na prędkość fal napięcia i prądu ma postać:

$$v = (LC)^{1/2} \quad (1)$$

Ponieważ wartości parametrów L i C schematów zastępczych chronionych elektrochemicznie rurociągów i pancerzy kabli są zbliżone do analogicznych wartości schematów zastępczych kabli elektroenergetycznych, którymi przesyła się energię elektryczną, więc można przyjąć, że prędkości fal wędrownych w tych różnych układach konstrukcji są także porównywalne; przy tym w kablach elektroenergetycznych są one rzędu $100 \text{ m}/\mu\text{s}$.



Rys. 2. Schemat zastępczy odcinka linii długiej o elementarnej długości

Z teorii linii długiej [1, 2] wynika, że przemieszczające się linią bezstratną fale napięcia i prądu nie ulegają tłumieniu. Ponadto po dotarciu do nieobciążonego, otwartego końca linii fala napięciowa ulega odbiciu, przy tym nie zmienia swojego znaku – biegunowości. Powoduje to podwojenie napięcia na otwartym końcu linii.

Jeśli R i G są większe od zera to chroniona konstrukcja jest linią długą stratną. Wtedy fala napięcia przemieszczająca się wzdłuż linii długiej jest tłumiona. Po dotarciu do końca linii ulega od niego odbiciu, a wartość chwilowa napięcia jest sumą wartości chwilowych fali przychodzącej i odbitej. Powoduje to zwiększenie polaryzacji elektrochemicznej konstrukcji, bardzo korzystne z punktu widzenia skuteczności jej ochrony elektrochemicznej.

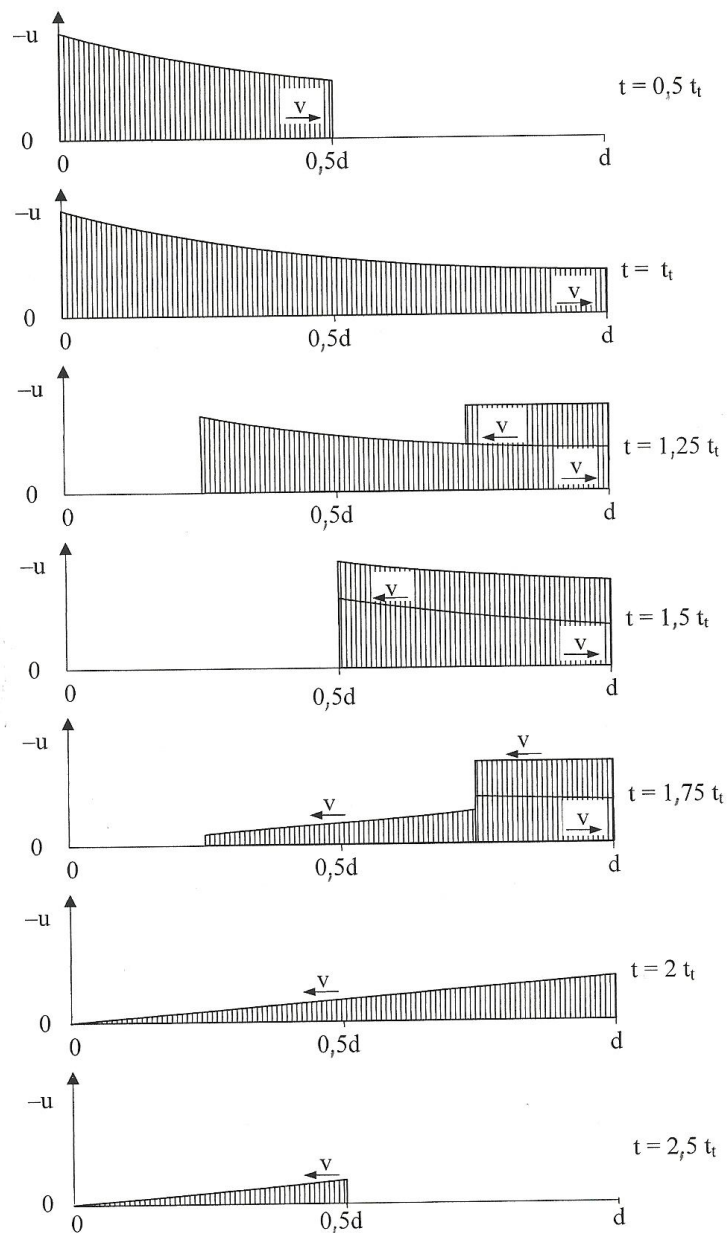
By dla ochrony elektrochemicznej wytworzyć w rurociągu lub kablu napięciowe fale wędrowne, należy zasilić tę ochronę ze źródła generującego powtarzalne impulsy napięciowe. Na rys. 3 przedstawiono schematycznie rozkład wędrownej fali napięciowej, na rurociągu chronionym katodowo, wytworzonej przez pojedynczy prostokątny impuls napięciowy, po różnym czasie t , liczonym od początku impulsu. Przy tym czas t jest krotnością czasu t_1 – jednokrotnego przejścia przez cały rurociąg napięciowej fali wędrownej. Ponieważ chroniony rurociąg jest linią długą stratną, więc w miarę oddalania się od źródła wartości chwilowe napięcia są coraz mniejsze.

Na rys. 3 przedstawione przebiegi ilustrują sytuację, w której po odbiciu fali napięciowej od końca i powrocie do źródła, nastąpiło całkowite jej stłumienie.

Z graficznego przedstawienia rozkładu przemieszczającej się na rurociągu fali napięciowej (rys. 3) wynika, że ochrona katodowa rurociągu powtarzalnymi falami napięciowymi, w porównaniu do ochrony napięciem stałym, zmniejsza różnice między stopniem spolaryzowania początku i końca rurociągu, pod warunkiem, że fala napięciowa przemieszczając się przez rurociąg nie zostanie całkowicie stłumiona przed dotarciem do jego końca. Warunkiem skutecznej ochrony jest, że wędrowna fala napięciowa odbita od końca rurociągu, po dodaniu się do części fali przychodzącej, powoduje polaryzację rurociągu w stopniu zapewniającym skuteczną ochronę. Oczywiście istnieją ograniczenia długości rurociągu, który może być skutecznie chroniony wędrowną falą napięciową. Jednak długość tego, skutecznie chronionego rurociągu, przy pomocy wędrownej fali napięciowej, będzie większa aniżeli długości analogicznego rurociągu, który byłby skutecznie chroniony napięciem stałym.

Ponadto z rys. 3 wynika, że przy uwzględnieniu konieczności zwiększenia polaryzacji newralgicznej, końcowej, części chronionego odcinka rurociągu, gdzie polaryzacja napięciem stałym jest najsłabsza, najlepsze efekty, polegające na stosunkowo równomiernej polaryzacji całej długości konstrukcji, uzyskuje się gdy czas trwania impulsu napięcia, wytwarzającego przemieszczającą się wzdłuż rurociągu falę napięciową, będzie w przybliżeniu równy czasowi ($2t_1$) potrzebnemu na przejście fali napięciowej do końca odcinka i jej powrotu do źródła. Np. przy prędkości fali wędrownej $100 \text{ m}/\mu\text{s}$, dla odcinka rurociągu o długości 10 km , czas trwania impulsu napięcia powinien wynosić około $200 \mu\text{s}$.

Jeśli tłumienie fali napięciowej na chronionym odcinku będzie małe, to powracająca fala napięciowa dociera z powrotem do źródła. Gdy impedancja źródła, patrząc od strony chronionej konstrukcji, będzie bardzo duża – można to uzyskać przez włączenie w obwód zasilania ochrony elektrochemicznej odpowiednio spolaryzowanej diody półprzewodnikowej – fala napięciowa ulegnie kolejnemu odbiciu, w ten sam sposób jak na końcu odcinka. Zatem może zaistnieć sytuacja, w której konstrukcja będzie polaryzowana wielokrotnie przemieszczającą się falą napięciową.



Rys. 3. Rozkłady wartości chwilowej napięcia na rurociągu o długości d chronionym katodowo po różnym czasie t , liczonym od chwili podania prostokątnego impulsu napięciowego o czasie trwania t_t , równym czasowi przebiegu przez całą długość rurociągu napięciowej fali wędrownej

Z powyższego wynika, że czas przerwy między kolejnymi impulsami polaryzującymi konstrukcję, w przypadku konstrukcji mającej słabą izolację, powinien być w przybliżeniu równy czasowi przejścia fali wędrownej przez konstrukcję od źródła do jej końca i z powrotem do źródła. Natomiast w przypadku konstrukcji mającej dobrą izolację ten czas może być znacznie dłuższy umożliwiając np. dwukrotne przejście napięciowej fali wędrownej przez całą chronioną konstrukcję.

3. WNIOSKI

Z pracy wynikają następujące wnioski, istotne dla projektantów elektrochemicznej ochrony rurociągów i kabli:

1. Polaryzując chroniony przed korozją rurociąg, kabel lub ich wyizolowane elektrycznie odcinki impulsem napięciowym, wytwarzamy w chronionej konstrukcji wędrowną falę napięciową. Fala ta przemieszcza się wzdłuż konstrukcji i po dojściu do jej końca, jeśli nie jest on uziemiony, ulega odbiciu. Poczym powraca w kierunku źródła, podobnie jak w linii elektrycznej długiej. Odbita fala ma tę samą biegunowość co fala przychodząca. Obie fale, przychodząca i odbita dodają się sobie, więc konstrukcja jest polaryzowana wypadkową falą wędrowną, będącą sumą fali przychodzącej i odbitej. Zwiększa to stopień polaryzacji końca konstrukcji, w porównaniu polaryzacją napięciem stałym, oraz sprawia, że rozkład potencjału wzdłuż rurociągu staje się bardziej wyrównany. Zatem wytwarzając w chronionej konstrukcji wędrowne fale napięciowe można zwiększyć długość konstrukcji skutecznie chronionej przed korozją
2. Czas trwania impulsu napięcia, wytwarzającego przemieszczającą się wzdłuż rurociągu falę napięciową, powinien być zbliżony do czasu potrzebnego na przejście fali napięciowej do końca chronionego odcinka rurociągu i jej powrotu do źródła.
3. Czas przerwy między kolejnymi, polaryzującymi rurociąg, impulsami napięcia powinien być w przybliżeniu równy czasowi przejścia fali wędrownej do końca rurociągu i jej powrotu do źródła, w przypadku rurociągu mającego słabą izolacji, a w przypadku rurociągu z dobrą izolacją, czas ten może być dwukrotnie, a nawet trzykrotnie większy.

LITERATURA

- [1] Bolkowski S., Teoria obwodów elektrycznych, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2017.
- [2] Lou van der Sluis, Transients in power systems, John Wiley & Sons, Chichester, Wielka Brytania, 2001.

- [3] Opydo W., Kulesza K., Kublicki Z., Twardosz G., Sposób elektroimpulsowej ochrony przed korozją wzdłużnych, metalowych konstrukcji, Patent RP, PL 196518 B1, 31.01.2008 WUP 01/08.
- [4] Revie R.W., Uhlig's corrosion handbook, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2011.
- [5] Wranglén G., Podstawy korozji i ochrony Metali, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.

CONCEPTION OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF PIPELINES WITH THE USE OF VOLTAGE TRAVELLING WAVE

The work presents a conception of electrochemical cathodic protection of a pipeline by means of voltage travelling waves generated by a source of repetitive voltage pulses. A single voltage pulse moves in the form of a voltage travelling wave that reaching pipeline end reflects backward without changing its polarity. The reflected part of the voltage wave superposes with the incoming one, strengthening, at the same time, polarization of the pipeline end. The above conception was verified by polarization of a steel pipeline at first with constant voltage and then with repetitive voltage pulses. Hence, pipeline polarization with repetitive voltage pulses enables increasing of the length of pipeline section that might be subject to effective electrochemical protection supplied from a single source.

(Received: 14. 02. 2017, revised: 28. 02. 2017)