

doi:10.15199/48.2019.01.32

Ochrona katodowa podziemnych sekcji trakcji elektrycznych

Streszczenie. Korozja podziemna konstrukcji stalowych w jest główną przyczyną degradacji podziemnej infrastruktury. Każdego roku wydaje się coraz większe kwoty na kontrolę, naprawę i utrzymanie zbiorników, rurociągów i innych struktur, co stało się poważnym problemem ekonomicznym. Dlatego też skuteczne wykorzystanie systemów przeciwdziałania korozji jest bardzo ważne. Wiele badań i symulacji udowodniło, że ochrona katodowa jest najbardziej efektywną i opłacalną metodą ograniczania korozji występującej w podziemnych elementach konstrukcji stalowych. W poniższym opracowaniu zaproponowano podejście oparte na modelowaniu systemu ochrony katodowej części konstrukcji znajdującej się w ziemi słupów trakcyjno-oświetleniowych, wykonanych ze stali typu R35 [1]. Głównym celem tego badania jest wykorzystanie narzędzi symulacyjnych do projektowania optymalnych systemów ochrony katodowej dla stali węglowej i stalowych konstrukcji transmisyjnych.

Abstract. Underground corrosion of steel structures in is the main cause of degradation of underground infrastructure. Every year, more and more money is spent on controlling, repairing and maintaining tanks, pipelines and other structures, which has become a serious economic problem. Therefore, effective use of anti-corrosion systems is very important. Many studies and simulations have proven that cathodic protection is the most effective and cost-effective method of reducing corrosion occurring in underground elements of steel structures. The following paper proposes an approach based on modeling of the cathodic protection system of a part of the structure located in the ground of traction and lighting poles made of R35 type steel [1]. The main purpose of this study is to use simulation tools to design optimal cathodic protection systems for carbon steel and steel transmission constructions. (**Cathodic protection of underground sections of electric traction**).

Słowa kluczowe: korozja galwaniczna, ochrona katodowa, anody galwaniczne, korozja podziemna.

Keywords: galvanic corrosion, cathodic protection, galvanic anodes, underground corrosion.

Wstęp

Obecnie, szczególnie w miastach, mamy do czynienia z dużą liczbą starzejących się konstrukcji transmisyjnych, takich jak słupy energetyczne, czy trakcyjne, a korozja podziemna stała się poważnym problemem zarówno technicznym, jak i ekonomicznym. Każdego roku wydawane są coraz większe kwoty na utrzymanie, przegląd i modernizację skorodowanych struktur. Bardzo ważne stały się odpowiednio skuteczne i ekonomicznie wykonywane techniki ograniczania korozji zaprojektowane specjalnie dla infrastruktury przesyłowej.

Słupy trakcyjne

Konstrukcje transmisyjne, takie jak słupy trakcyjne i trakcyjno-oświetleniowe, przystosowane do podwieszania sieci trakcyjnej tramwajowej oraz montażu oświetlenia dla dróg publicznych, zabezpieczane są antykorozyjnie przez cynkowanie ogniowe na zewnątrz i wewnątrz słupa wg normy DIN 1461 oraz dodatkowo stosowane jest nakładanie powłok malarskich. Słupy te składają się z dwóch sekcji: nadziemnej, która podtrzymuje przewód napowietrzny i podziemnej, tj. fundamentu konstrukcyjnego, który podtrzymuje sekcję nadziemną. Obie części konstrukcji poddane są starzeniu w wyniku stresów środowiskowych i mechanicznych. Jednak znacznie wyższe ryzyko degradacji materiału jest na fundamencie z powodu działania korozji podziemnej, która jest znacznie trudniejsza do identyfikacji, a co za tym idzie, także dużo groźniejsza, ponieważ nie jest widoczna. Przykładowy słup trakcyjny przedstawiono na rysunku 1.

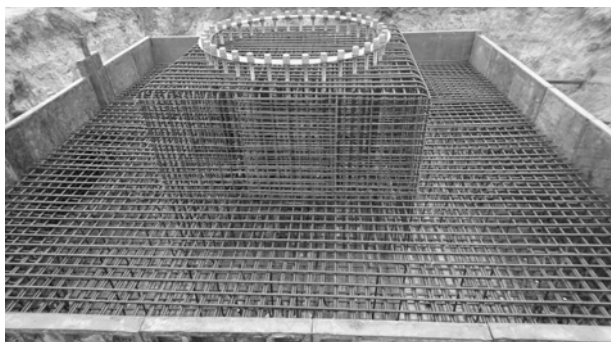
Skuteczną i niezawodną metodą ograniczania korozji podziemnej dla znajdujących się w ziemi części konstrukcji stalowych okazała się ochrona katodowa. Jest ona też stosunkowo dobrze zbadana dla struktur o prostych geometriach, takich jak np. systemy rurociągów [3-6]. Jednak brak jest wytycznych dotyczących projektowania systemów ochrony katodowej podziemnych elementów dla struktur bardziej złożonych, jak np. podstawy słupów energetycznych. Związane jest to głównie z szeroką gamą projektów fundamentów. Szczegółowe modele geometryczne umożliwiają precyzyjne obliczenie całkowitej powierzchni konstrukcji. Jednak przy bardziej złożonych kształtach, jak np. szeroka gama projektów fundamentów dla słupów kratowych, w projektowaniu i optymalizacji

pojawia się więcej trudności przy optymalizacji systemu ochrony katodowej starzejących się konstrukcji także ze względu na różnice w warunkach międzyfazowych metal-gleba. Przy tego typu konstrukcjach, o różnej geometrii, nie jest możliwe przygotowanie uniwersalnego projektu łoża anodowego dla wszystkich rodzajów fundamentów.



Rys. 1. Konstrukcja słupa trakcyjnego [2]

Dodatkowo, przy mocowaniu np. słupów energetycznych mamy, do czynienia z fundamentem z żelbetu, w którym na korozję narażone jest zbrojenie. Beton, szczególnie wilgotny, jest w miarę dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego i dlatego stal zbrojeniowa może być w nim zabezpieczona przed korozją także z wykorzystaniem ochrony katodowej. Ochronę katodową żelbetu znajdującego się w środowisku wilgotnym, czyli głównie stali zbrojeniowej znajdującej się w betonie nasyconym wodą, wykonuje się tak samo jak ochronę konstrukcji stalowych, tzn. anody, które dostarczają prąd ochronny znajdują się odpowiedniej odległości w środowisku elektrolitycznym [7]. Przykład fundamentu pod słupy linii elektroenergetycznych 110 kV – 400 kV pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Fundamentu pod słupy linii elektroenergetycznych 110kV – 400kV: zbrojenie, podstawa żelbetowa, słup energetyczny na fundamentie [8]

Ze względu na różnice w charakterystyce gleby, konstrukcje systemów ochrony katodowej różnią się, nawet w przypadku struktur o identycznej geometrii. Niemniej nie jest uzasadnione ekonomicznie gromadzenie danych terenowych dla wszystkich korodujących struktur np. wzdłuż linii energetycznej i odrębnego projektowania systemu ochrony dla każdej konstrukcji. Wystarczy przeprowadzić badanie, aby wybrać kilka konstrukcji, które będą mogły reprezentować stan wszystkich pozostałych struktur. By badania modelowe były dokładniejsze, można przeprowadzić pewne testy na miejscu w celu zebrania odpowiednich danych do scharakteryzowania środowiska glebowego, jak np. rezystywność gruntu. Ma ona duże znaczenie dla obliczenia liczby anod. Pomiar można wykonać metodą elektrooporową, wykorzystując prosty układ czteroelektrodowy Wennera [9]. Prąd ochrony zależy od rezystywności gruntu, dlatego duże znaczenie będzie miało modelowanie systemów ochrony dla różnych typów gruntu.

W pierwszym opracowaniu skupiono się jednak na słupie trakcyjnym o przekroju kołowym, pozostawiając fundamenty kratowe kolejnym obliczeniom. Wybrano system ochrony galwanicznej, przy czym przedstawione założenia można także zmodyfikować do systemów wykorzystujących zewnętrzne źródło prądu, tzw. ICCP. Do zasilania układu można wykorzystać np. ogniwa fotowoltaiczne [10]. W przyszłych publikacjach planowane jest zoptymalizowanie systemu ochrony katodowej dla innych typów fundamentów.

Obliczenia

Wybrano anody ze stopu magnezu o wysokim potencjale (typ M1, według ASTM B843-13) [11], przy uwzględnieniu minimum 20 lat żywotności katodowego systemu ochrony. Następnie obliczana jest wymagana

wydajność układu ochrony, minimalna masa anody oraz jej ułożenie, by uzyskać jak najlepszą ochronę.

Specyfikacja materiału anody przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Specyfikacja standardowej anody magnezowej (skład w % wagowych) [11]

	Wysoki potencjał (M1)
Cu	Max 0,02
Al	Max 0,01
Fe	Max 0,03
Mn	0,5 – 1,3
Ni	Max 0,001
Inne	Max 0,035
Mg	pozostałe
Wydajność	50%
Potencjał	1,70 V Ag/AgCl
Pojemność [Ah]	1230 na kg

Równania

Podstawowym równaniem do opisu prądu jonowego w elektrolicie (np. w glebie), opisującym transport jonów pomiędzy anodą i katodą jest równanie Nernsta-Plancka [12]:

$$(1) \quad N_i = -z_i u_i F c_i \nabla \varphi - D_i \nabla c_i + c_i \mathbf{v} = 0$$

gdzie: N_i jest wektorem masy (mol/cm²s) jonu i , z_i jest liczbą ładunku jonu i , u_i jest współczynnikiem ruchliwości (mol cm²/Js) dla jonu i , F jest stałą Faradaya (96487 C/mol), c_i jest stężeniem (mol/cm³) gatunku i , φ to potencjał elektryczny (V), D_i to współczynnik dyfuzji (cm²/s) jonu i , \mathbf{v} jest wektorem prędkości objętościowej elektrolitu (m/s).

Po odpowiednich przekształceniach i uproszczeniach otrzymujemy dobrze znane równanie Laplace'a:

$$(2) \quad \nabla(-\sigma \nabla \varphi) = 0$$

gdzie:

$$(3) \quad \sigma = -F^2 \sum_i z_i^2 u_i c_i$$

gdzie: σ jest konduktywnością elektrolitu mierzoną w S/cm.

Warunki brzegowe

Równanie (2) musi być rozwiązane na obszarze elektrolitu, z zastrzeżeniem odpowiednich warunków brzegowych na powierzchni anody i katody [13]. Wykorzystano w tym celu równania wiążące gęstość prądu na granicy elektroda-elektrolit z potencjałem elektrody i elektrolitu.

Po otrzymaniu rozkładu potencjału, gęstość prądu j w każdym punkcie elektrolitu można obliczyć na podstawie potencjalnego gradientu w punkcie:

$$(4) \quad j = \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n}$$

Rozkład potencjału w elektrolicie opisuje równanie:

$$(5) \quad \text{div}(-\sigma_a \text{grad} V_a) = 0$$

Na granicy anoda-elektrolit and katoda-elektrolit mamy warunki brzegowe Neumana dane równaniem:

$$(6) \quad \left. \frac{\partial V}{\partial n} \right|_{r=r_1} = -\frac{j_0}{\sigma} \left(\exp\left(\frac{\eta}{\beta}\right) - \exp\left(-\frac{\eta}{\beta}\right) \right)$$

gdzie nadpotencjał na katodzie i anodzie jest dany:

$$(7) \quad \eta = V - V_e - E_{\text{eqa}}$$

Wartości parametrów w równaniu (6) zależą od materiału elektrody i właściwości elektrolitu. Zależą m.in. od przewodności gleby, jej poziomu pH, stężenia tlenu (napowietrzania gleby), zawartości materii organicznej, stężenia jonów metali, zanieczyszczenie chlorkami, temperatury, powierzchni elektrod.

Powyższe równania są nieliniowe i muszą być rozwiązane numerycznie.

Modelowanie systemu ochrony

Podstawy:

Proponowany proces projektowania obejmuje następujące kroki:

- trójwymiarowe modelowanie geometrii zakopanej struktury,
- wybór programu i podstawowe obliczenia,
- modelowanie metodą elementów skończonych.

Podstawowym celem proponowanego podejścia do modelowania jest znalezienie szczegółowych rozkładów potencjału i gęstości prądu na zakopanych powierzchniach konstrukcji. Takie informacje pozwalają na zbadanie działania układu ochrony katodowej w celu wystarczającego spolaryzowania struktury, by spełnione zostały kryteria ochrony.

Ze względu na różnice w charakterystyce gleby konstrukcja systemów ochrony katodowej może się różnić, nawet w przypadku konstrukcji o tej samej geometrii. Biorąc jednak pod uwagę biegi trakcyjne wspomagające np. trakcję tramwajów miejskich, model można z pewnym przybliżeniem uprościć do jednego rodzaju gleby. Nie będzie to już możliwe przy obliczaniu ochrony dla słupów energetycznych, znajdujących się w dużych odległościach w różnych lokalizacjach.

Schemat konstrukcji słupa trakcyjnego przedstawiono na rysunku 3.

Modelowanie 3D:

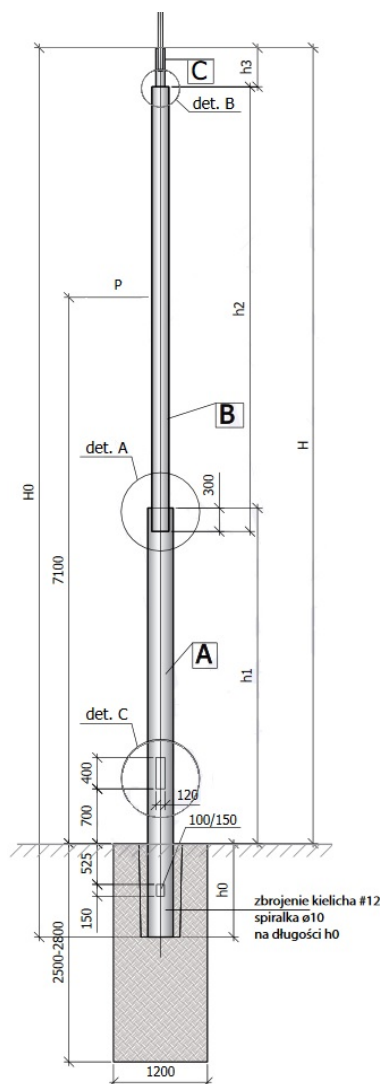
Badaniu poddano tylko sekcję podziemną słupa trakcyjnego. Do symulacji elektrochemicznej wybrano obszar o wymiarach 0,8 x 0,6 x 1,2 m jako domenę elektrolitu (gleby) oraz dobrano anodę magnezową z katalogu dostępnych na rynku. Konstrukcja systemów ochrony katodowej jest zależna m.in. od parametrów gleby.

Do modelowania ochrony wykorzystano program FlexPDE v. 7.0. Anodę zamodelowano jako ułożoną równoległe do słupa, co w rzeczywistości daje szybka i ekonomiczną metodę instalacji.

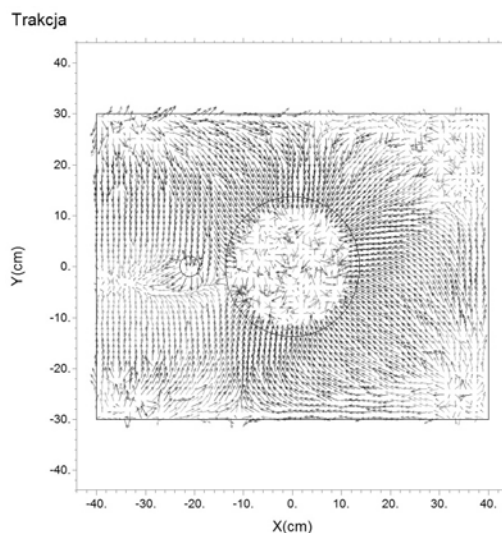
Na rysunku 4 przedstawiono wektor gęstości prądu wokół badanego słupa trakcji. Zwrot wektora jest skierowany do chronionej konstrukcji, zatem ochrona jest w pełni realizowana przy zastosowaniu tylko jednej anody magnezowej, ustawionej równoległe do chronionej konstrukcji.

Podsumowanie

W powyższym przykładzie zaproponowano podejście numeryczne w celu zaprojektowania systemów ochrony katodowej dla znajdującej się w ziemi struktury stalowej (tu: słupa trakcyjnego) o prostej geometrii. W kolejnych badaniach autorka planuje zająć się strukturami o geometrii bardziej złożonej. By obliczenia były dokładniejsze należy także uwzględnić zmienną oporność warstw gleby, powłokę ochronną nałożoną na badanych konstrukcjach i jej wpływ na działanie systemu ochrony katodowej, jak również obecność betonowego kołnierza wokół podziemnej części konstrukcji.



Rys. 3. Schemat konstrukcji słupa trakcyjnego [2]



Rys. 4. Wektor gęstości prądu w elektrolicie.

Niestety, koszty ochrony katodowej są trudne do oszacowania. Zastosowanie ochrony katodowej musi być poprzedzone pracami diagnostycznymi i projektowymi. Każde zabezpieczenie musi być indywidualnie

przygotowane. Są to rozwiązania droższe od „klasycznej” naprawy, ale poprzez ich wprowadzenie można uniknąć konieczności wykonywania właśnie takich napraw, którym towarzyszy potrzeba zapewnienia dostępu i przynajmniej częściowego wyłączenia danej konstrukcji z użytkowania, czy jej wymiany na nową.

Autor: dr inż. Agnieszka Wantuch, Akademia Górniczo-Hutnicza, katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-058 Kraków, E-mail: awantuch@agh.edu.pl.

LITERATURA

- [1] PN-89/H- 84023/07
- [2] Katalog słupów trakcyjnych i trakcyjno-oświetleniowych oraz masztów trakcyjno-oświetleniowych MIRS, Przedsiębiorstwo Produkcyjno Usługowe MIRS Sp. z o.o., 2009
- [3] Wantuch A., Cathodic protection of underground objects, *Przegląd Elektrotechniczny* 86 (2010), nr 12, 167-169
- [4] Shabangu T. H., Shrivastava P., Abe B. T., Adedeji K. B., Olubambi P.A., Influence of AC interference on the cathodic protection potentials of pipelines: Towards a comprehensive picture, 2017 *IEEE AFRICON*, 18-20 September 2017, 618-623
- [5] Wantuch A., Katodowa ochrona podziemnych zbiorników: porównanie wyników obliczeniowych z pomiarowymi, XXII sympozjum środowiskowe PTZE: Sandomierz, 9–12 września 2012
- [6] Kurgan E., Wantuch A., Boundary element method in modeling of the galvanic corrosion cell of underground structures, *Przegląd Elektrotechniczny* 92 (2016), nr 12, 81-84
- [7] PN-EN 12696:2004 Ochrona katodowa stali w betonie
- [8] <http://antora.pl/oferta.html>, 10.09.2018
- [9] Pasierb B., Techniki pomiarowe metody elektrooporowej, Środowisko - Czasopismo techniczne, Politechnika Krakowska, 2-Ś/2012, zeszyt 23, rok 109
- [10] Janowski M., Wantuch A., ICCP cathodic protection of tanks with photovoltaic power supply, E3S Web of Conferences, 2016 vol. 10 art. no. 00029, 1-4
- [11] <http://www.cptech.net/pdf/mag1.pdf>.
- [12] Newman J., Thomas-Alyea K. E., *Electrochemical Systems*, 3rd. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004
- [13] Kurgan E., Wantuch A., Impressed cathodic protection of underground structures, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 5, 96-99
- [14] Frankowski, P.K. Corrosion Detection and Measurement Using Eddy Current Method, in 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW), IEEE Xplore, 2018, 398-400.
- [15] Wantuch A., Kurgan E., Gas P., Numerical Analysis on Cathodic Protection of Underground Structures, in 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), IEEE Xplore, 2016, art. no. 7800225, [- 1- 4], DOI: 10.1109/WZEE.2016.7800225