

## SYSTEM MONITOROWANIA LINII KABLOWYCH I NAPOWIETRZNYCH WYSOKICH NAPIĘĆ

Marek OLESZ<sup>1</sup>, Grzegorz SZYNGIERA<sup>2</sup>, Tomasz SZYMCZAK<sup>3</sup>

- |                         |                |  |
|-------------------------|----------------|--|
| 1. Politechnika Gdańska |                |  |
| tel: 58 347 1820        | fax: 583472136 | e-mail: m.olesz@ely.pg.gda.pl  |
| 2. NKT Cables S.A.      |                |  |
| tel: 58 344 7247        | fax:           | e-mail: <a href="mailto:grzegorz.szyngiera@nktcables.pl">grzegorz.szyngiera@nktcables.pl</a> |
| 3. NTK Cables S.A.      |                |  |
| tel :691 744 048        | fax            | e-mail : <a href="mailto:tomasz.szymczak@nktcables.pl">tomasz.szymczak@nktcables.pl</a>      |

**Streszczenie:** Wprowadzony do eksploatacji w systemach energetyki zawodowej system VALCAP firmy NKT cables umożliwia monitoring temperatury wzdłuż żyły przewodu z uwzględnieniem obciążenia oraz temperatury zewnętrznej (tylko dla linii napowietrznych). Referat przedstawia stosowaną w praktyce metodę analizy dopuszczalnego obciążenia prądowego kabla lub przewodu linii napowietrznej w zależności od występujących aktualnych warunków zewnętrznych.

**Słowa kluczowe:** monitoring temperatury, linii napowietrzne i kablowe, prognozowanie obciążenia linii

### 1. WSTĘP

W eksploatacji układów izolacyjnych do obowiązkowych procedur należy badanie stanu izolacji. Istnieje szereg, coraz częściej stosowanych w praktyce, nieniszczących metod pozwalających na ocenę stanu izolacji podczas jej użytkowania. Wymienić tu należy analizę prądów polaryzacji i depolaryzacji w izolacji, rozproszenia dielektrycznego lub napięcia powrotnego.

Analiza odpowiedzi prądowej dielektryka na skok jednostkowy napięcia jest podstawową metodą badawczą stosowaną w energetyce do badania stanu izolacji, a szczególnie do wykrywania w niej wyraźnych wad i zawiłgocenia. Cennym uzupełnieniem pomiarów polaryzacyjnych jest analiza depolaryzacji w czasie. Metrologicznie stanowi to zagadnienie trudniejsze, ponieważ tylko ładunki przestrzenne w próbce są źródłem niewielkiego napięcia w obwodzie pomiarowym elektrometru. Przy pomiarze niewielkich sygnałów prądowych należy rozwiązać szereg problemów związanych z separacją sygnału mierzonego od niepożądanego zakłóceń.

W praktyce eksploatacyjnej pomiary rezystancji izolacji i współczynnika polaryzacji nie dają jednoznacznych informacji co do stanu technicznego linii kablowej. Ze względu na stosowane w czasie pomiarów eksploatacyjnych rezystancji izolacji, zgodnie z normą [1], zazwyczaj niskie poziomy napięcia stałego ( $\geq 2,5$  kV) uzyskuje się dość zróżnicowane wyniki. Potwierdzeniem są doświadczenia eksploatacyjne energetyki zawodowej zawarte w [2]. W jednym z rejonów energetycznych Polski Północnej po analizie protokołów prób odbiorczych z pomiarów rezystancji izolacji linii

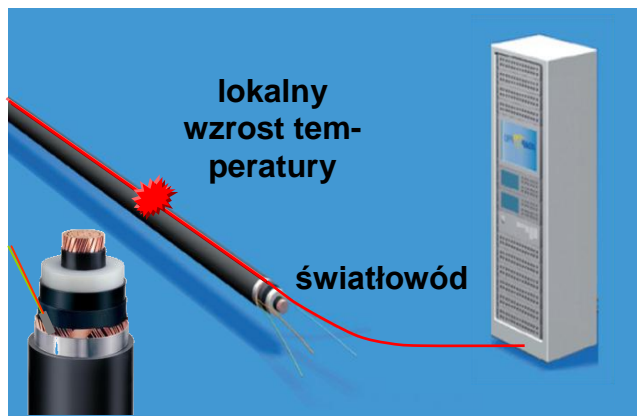
kablowych YHAKX mierzonych przy napięciu 2,5 kV oraz prądu upływu rejestrowanego przy napięciu stałym 40 kV można stwierdzić zasadniczą różnicę w wyliczonych wartościach rezystancji: 400 M $\Omega$ /km długości linii (pomiar rezystancji izolacji przy napięciu 2,5 kV) i tylko 100 M $\Omega$ /km przy próbie napięciem stałym linii [2].

Diagnostyka izolacji pozwala tylko prognozować stan kabla w chwili wykonania pomiaru. Ze względu na konieczność utrzymania parametrów jakościowych energii elektrycznej – głównie wyeliminowania przerw w napięciu zasilającym lepszym rozwiązaniem może być monitorowanie stanu izolacji kablowej po to, aby natychmiast w przypadku zagrożenia podejmować wcześniej określone decyzje łączeniowe, tak aby utrzymać bezprzerwowe zasilanie.

Jednym z rozwiązań pomocnych w monitorowaniu linii kablowych jest system opracowany przez firmę NKT Cables, mający na celu optymalizację zdolności przesyłowych linii dopasowaną do jej stanu technicznego i warunków zewnętrznych. Obecnie zdolność przesyłowa tych linii zostaje ustalona na podstawie wyników obliczeń według prostych modeli teoretycznych, co w praktyce przekłada się na stosowanie dużego zapasu bezpieczeństwa. Zazwyczaj zakłada się dla linii określoną obciążalność długotrwałą zależną od: wytrzymałości cieplnej izolacji, temperatury otoczenia, przekroju żyły, przewodności żyły oraz rezystancji cieplnej poszczególnych warstw izolacji [3]. Wartość obciążalności długotrwałej projektant linii kablowej przyjmuje zwykle z tabel, gdzie podano obliczone wartości przy założeniu obliczeniowej temperatury otoczenia: 25°C dla kabli i przewodów w pomieszczeniach i 20°C dla kabli ułożonych w ziemi [4]. Podejście takie powoduje w praktyce sytuacje niedociążenia lub przeciążenia kabla w skrajnych temperaturowych warunkach zewnętrznych. Należy zauważyć, że zastosowanie muf, głowic i przepustów kablowych może powodować zupełnie inne warunki oddawania ciepła w ziemi, a tym samym lokalnie inne rozkłady temperatury wewnątrz izolacji kabla.

W celu optymalnego wykorzystania możliwości przesyłowych kabla w NKT Cables opracowano system VALCAP polegający na zaprojektowaniu i wytworzeniu kabla z wprowadzonym światłowodem umożliwiającym pomiar temperatury wzdłuż długości ekranu. Otrzymane

wyniki pomiarów poprzez wykorzystanie modelu RTTR (Real Time Thermal Rating – obliczenia temperaturowe w czasie rzeczywistym) pozwalają wymusić obciążenie nie dopuszczające do wystąpienia degradacji termicznej.



Rys. 1. Poglądowe przedstawienie pomiaru rozkładu temperatury światłowodem w ekranie kabla w celu optymalnego obciążenia linii

Doświadczenia firmy NKT w projektowaniu tego rodzaju systemów sięgają 30 lat. Rozpoczęto wówczas prace nad wykorzystaniem zjawisk rozpraszania światła - Rayleigha, Brillouina oraz Ramana w monitorowaniu rozkładu temperatury poprzez badania rozwojowe systemu DTS - Distributed Temperature Sensing Technology. W owym czasie wskutek małych możliwości obliczeniowych komputerów nie zbudowano ostatecznie stabilnego informatycznie systemu monitoringu, ze względu na zbyt dużą liczbę danych pomiarowych, które należy dodatkowo wizualizować w czasie i odległości od jednostki centralnej.

W obecnie wprowadzonej do eksploatacji linii napowietrznych i kablowych technologii VALCAP firma NKT Cables wykorzystuje do pomiaru temperatury reflektometrię optyczną w dziedzinie częstotliwości OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry). Główną zaletą technologii OFDR jest ciągła praca lasera oraz wąskie pasmo wykrywania sygnału rozproszenia wstecznego, dzięki czemu osiąga się znacznie lepszy stosunek sygnału do szumu, niż ma to miejsce w przypadku użycia technologii pulsacyjnej. Ta zaleta techniczna umożliwia wykorzystanie niedrogich laserów półprzewodnikowych na bazie diod i innych elementów elektronicznych do uśredniania sygnału. W poprzednim systemie OTDR opartym na pomiarze w funkcji czasu wykorzystano z znacznie droższych laserów o większej mocy.

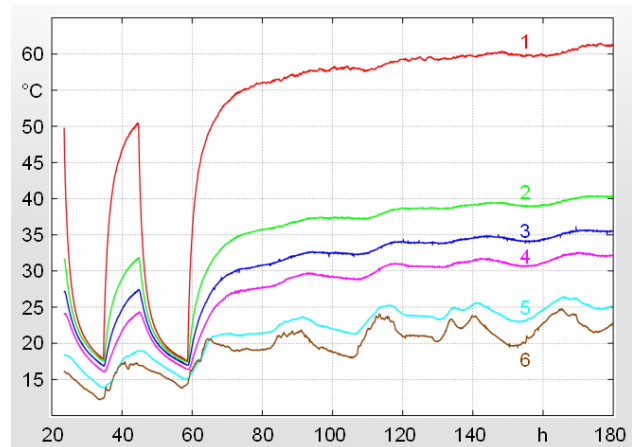
## 2. IDEA SYSTEMU VALCAP

System VALCAP stanowi kompleksowe rozwiązanie problemu określenia obciążalności dopuszczalnej dla linii kablowych, podmorskich i napowietrznych. VALCAP składa się z 3 elementów współpracujących ze sobą:

- specjalnego rodzaju kabla z wbudowanym światłowodem przy ekranie lub wewnątrz żyły roboczej przewodu linii napowietrznej wraz z odpowiednimi urządzeniami pozwalającymi uzyskać profil temperaturowy wzdłuż światłowodu na długości do 100 km,
- systemu ADAPPRO pozwalającego wyliczyć dopuszczalne obciążenie na podstawie modelu obliczeniowego RTTR zbudowanego na podstawie wiedzy technicznej zawartej w normach lub uzyskanej z przeprowadzonych symulacji rozkładów temperatur wewnątrz izolacji kabla,

- systemu wsparcia technicznego w postaci wiedzy udostępnionej użytkownikowi systemu w czasie szkoleń, projektowania i serwisowania zainstalowanych urządzeń.

System DTS pozwala określić w czasie obciążenia kabla lub linii napowietrznej rzeczywisty rozkład temperatury wzdłuż zainstalowanego światłowodu. Następnie w przypadku linii kablowych na podstawie zmierzonej temperatury ekranu poprzez model obliczeniowy RTTR, opracowany program komputerowy wylicza temperaturę żyły roboczej.



Rys. 2. Wyniki obliczeń temperatury żyły roboczej (krzywa nr 1) w funkcji obciążenia na podstawie temperatury uzyskanej z światłowodu umieszczonego w różnych miejscach wokół kabla (nr 2 – ekran, nr 3 i 4 położenie odpowiednio z lewej i prawej strony kabla, nr 5 i 6 – w pewnej odległości od kabla)

Dzięki powyższym operacjom pomiarowym i programowym użytkownik systemu ma natychmiast informację o krytycznych wzrostach temperatury, które są automatycznie nanoszone na topografię kabla, jak np. na rysunku 3.

W przypadku niebezpieczeństwa przekroczenia temperatury dopuszczalnej długotrwale następuje uruchomienie alarmu, który pozwoli operatorowi dokonać odpowiednich przełączeń w celu np. zmniejszenia obciążenia kabla lub przewodu.

Aby zdobyć informację o dopuszczalnym obciążeniu, które nie spowoduje uszkodzenia kabla lub przewodu, model RTTR wymaga oprócz profilu temperaturowego także wprowadzenia przez użytkownika parametrów elektrycznych kabla, i danych środowiskowych.

W systemie VALCAP Istnieją dwa różne modele obliczeniowe, odpowiednio dla linii napowietrznej i kablowej. W modelu linii napowietrznej uwzględnia się dodatkowo poza profilem temperatury – dane prędkości wiatru i temperatury otoczenia uzyskiwane z stacji meteorologicznych położonych blisko słupów.



Rys. 3. Obliczona w modelu RTTF temperatura żyły roboczej na podstawie wprowadzonego profilu temperaturowego ekranu kabla, otrzymanego z światłowodu w systemie DTS

Centralne urządzenia kontrolne i pomiarowe DTS i RTTR mogą być zainstalowane w podstacji lub umieszczone w chronionym budynku w pobliżu systemu kablowego lub linii napowietrznej. Dane można przysyłać za pomocą LAN lub bezprzewodowo siecią GSM do właściwej stacji kontrolnej. Dostępne są różne dodatkowe dostosowane do indywidualnych potrzeb użytkownika rozwiązania programowe do transmisji i zarządzania danymi oraz narzędzia ich wizualizacji, które można przystosować do obliczania stanu obciążenia i prognozowania poziomu temperatury. Istnieją także aplikacje do wskazywania różnych parametrów związanych z obciążeniem mechanicznym i prądowym kabla elektroenergetycznego.

System VALCAP wraz z oprogramowaniem DTS i RTTR, koniecznymi układami sprzętowymi i programami do zarządzania danymi, oferowany jest przez firmę NKT Cables jako jednorodny pakiet.

#### 4. RTTR – MODEL DLA KABLI WYSOKONAPIĘCIOWYCH

Korzystając z modelu ADAPPRO i RTTR do określania obciążeń systemów kabli wysokonapięciowych, możliwe jest prognozowanie zachowania termicznego monitorowanego systemu kablowego, a zatem najlepsze wykorzystanie zdolności przesyłowych. Do tego celu wykorzystywany jest zastępczy obwód cieplny na podstawie norm IEC 60287 [4 – 9] oraz IEC 60853 [10]. Normy te zawierają wzory do obliczania dopuszczalnej obciążalności długotrwałej kabla począwszy od linii pojedynczej poprzez analizę różnych konfiguracji przestrzennych kabli lub przewodów również z niesymetrycznym lub cyklicznym obciążeniem.

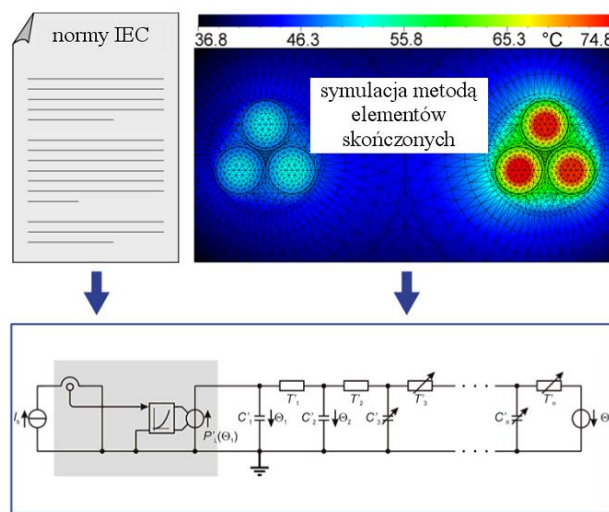
W konwencjonalnych systemach monitoringu parametry zastępczego obwodu cieplnego są określone i pozostają nie zmienione. Natomiast ADAPPRO to system, który się samodzielnie przystosowuje do zmieniających się warunków zewnętrznych pracy linii kablowej, co wpływa na bezpieczeństwo dla izolacji rozkład temperatury wzdłuż długości linii.

Jeżeli otaczające warunki termiczne się zmieniają, na przykład ze względu na wysychanie gleby lub obecność innego źródła ciepła np. w postaci linii kablowej ADAPPRO przystosowuje parametry w zastępczym obwodzie cieplnym tak, że prognozy dopuszczalnego prądu obciążenia będą miały wysoką dokładność, nawet w zmieniających się warunkach.

Wartości początkowe dla elementów w zastępczym obwodzie cieplnym można określić na podstawie norm [4 –

9] lub symulacji matematycznych. Symulacje matematyczne są jedynym rozwiązaniem, jeżeli monitorowany system, układ kabli lub ich wymiary nie są objęte normami. Programy polowe oparte na metodzie elementów skończonych i uwzględniające nieliniowe właściwości materiałów są szczególnie przydatne do rozwiązania nietypowych układów pracy linii kablowej. Za pomocą tych programów możliwe jest przede wszystkim określenie z dużą dokładnością elementów zastępczego obwodu cieplnego dla wewnętrznych elementów strukturalnych systemu kablowego.

W systemie ADAPPRO stałe pozostają jedynie elementy zastępczego obwodu cieplnego pomiędzy przewodem i miejscem pomiaru temperatury, natomiast wszystkie pozostałe parametry są regulowane. Ponieważ dokładna wiedza o temperaturowych warunkach środowiskowych jest w większości przypadków niedostępna lub może się znacząco zmieniać, przystosowanie tych parametrów w zastępczym obwodzie cieplnym jest szczególnie ważne dla osiągnięcia wymaganej dokładności prognozowania maksymalnego obciążenia.

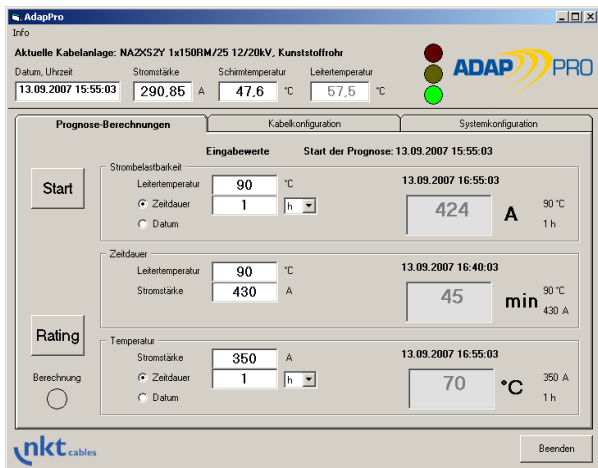


Rys. 4. Model RTTR dla kabli wysokonapięciowych tworzony na podstawie danych pomiarowych temperatury ekranu lub poprzez analizę w programie polowym

W zależności od charakterystyki monitorowanego systemu kablowego, pomiaru temperatury można dokonać w ekranie, na zewnętrznej powłoce lub w rdzeniu układów trójżyłowych. Ponieważ znane są parametry wewnętrznych elementów obwodu zastępczego, można obliczyć temperaturę żyły roboczej.

Jeżeli dane z pomiarów (natężenie prądu i temperaturę ekranu) prześle się z komputera zbierającego dane do jednostki głównej wykonującej obliczenia prognoz na określony czas w regulowanych odstępach, to możliwe jest korygowanie zastępczego obwodu cieplnego. W obliczeniach wykorzystuje się analizę potencjałów węzłowych. Za pomocą algorytmu optymalizacji, parametry elementów w zastępczym obwodzie cieplnym są korygowane tak długo, aż obliczenia temperatury i jej zmiany w czasie pasują do danych pomiarowych.

Obliczenia prognozowanej obciążalności, dozwolonego czasu jego trwania i temperatury przewodu wykonywane są za pomocą zastępczego obwodu cieplnego optymalizowanego w podany wyżej sposób. Zasadę działania ADAPPRO pokazuje rysunek 4, a podstawowe dla użytkownika wyniki obliczeń rysunek 5.



Rys. 5. Wyniki obliczeń w programie ADAPPRO informujące użytkownika o dopuszczalnym obciążeniu kabla, czasie jego trwania i temperaturze żyły roboczej

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Technologia VALCAP obejmująca monitorowanie temperatury w połączeniu z modelem RTTR będzie przyszłościowym rozwiązaniem pozwalającym na eksploatację systemów kablowych i linii napowietrznych wysokich napięć w sposób bezpieczny, wydajny i ekonomiczny.

Firma NKT Cables oferuje rozwiązania systemów VALCAP zawierające układ RTTR do monitorowania systemów kablowych wysokich napięć i napowietrznych linii przesyłowych.

Powyższe rozwiązanie techniczne można łatwo zastosować w nowej, ale także w istniejącej infrastrukturze bez zakłóceń lub ryzyka przerw w eksploatacji systemu. Otrzymane dane pomagają w analizie warunków obciążenia.

VALCAP umożliwia maksymalne wykorzystanie możliwości przesyłowych sieci w sposób bezpieczny i elastyczny. Optymalizacja obciążalności wpływa bezpośrednio na przyszłe decyzje inwestycyjne dotyczące nowych linii. W odniesieniu do niedawnych przerw w zasilaniu, oczywisty jest ogromny wpływ stosowania omawianego systemu na bezpieczeństwo sieci.

#### BIBLIOGRAFIA

1. PN – E – 47000:1998 Wytyczne przeprowadzania

### ON – LINE SYSTEM FOR CABLE AND OVERHEAD HIGH VOLTAGE LINES

**Key-words:** monitoring of temperature, overhead and cable lines, estimation of load line

**Abstract:** The monitoring of the temperature makes possible the introduced to exploitation system VALCAP of the NKT Cables company. The system measures the temperature along the conductor with the regard external temperature (only for overhead lines). The paper presents the applied in the practice method of the analysis of the acceptable load of cable or the conductor of the overhead line in dependence from stepping out external conditions.

pomontażowych badań odbiorczych.

2. Olesz M.: Wpływ drzewienia elektrycznego na prądy polaryzacyjne i depolaryzacyjne w izolacji polietylenowej, X Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, EUI '05, Krynica 27-30.09.2005 r., Przegląd Elektrotechniczny, Konferencje, 2005, s. 193-196,
3. Musiał E.: Obciążalność cieplna przewodów i kabli. Ogólnopolskie Szkolenie Techniczne „Zabezpieczenia niskonapięciowych instalacji i urządzeń elektrycznych – cz. II” Poznań – Kiekrz, maj 2002. ENERGO-EKO-TECH. 2002, s. 1 -19
4. IEC 60287-1:2006 Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1. Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses. Section 1 General. Section 2: Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation Section 3. Current sharing between parallel single-core cables and calculation of circulating current losses
5. IEC 60287-2-1:1994+A2:2006 Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2: Thermal resistance. Section 1: Calculation of thermal resistance
6. IEC 60287-2-2:1995 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2: Thermal resistance - Section 2: A method for calculating reduction factors for groups of cables in free air, protected from solar radiation
7. IEC 60287-3-1:1999 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3-1: Sections on operating conditions - Reference operating conditions and selection of cable type
8. IEC 60287-3-2: 1996 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3: Sections on operating conditions - Section 2: Economic optimization of power cable size
9. IEC 60287-3-3:2007 Electric cables. Calculation of the current rating. Sections on operating conditions. Cables crossing external heat sources
10. IEC 60853-1:2008 Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables - Part 1: Cyclic rating factor for cables up to and including 18/30 (36) kV. Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages. Part 3: Cyclic rating factor for cables of all voltages, with partial drying of the soil