



Aleksandra RAKOWSKA

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki

## Rozwój kabli wysokiego napięcia a doświadczenia eksploatacyjne

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono przegląd najnowszych konstrukcji kabli wysokich i najwyższych napięć. Omówiono także niektóre ze szczególnych linii kablowych WN oraz doświadczenia eksploatacyjne na przykładzie danych z kilku państw.

**Abstract. (Development of high voltage cables and service experiences).** Review of the newest HV and EHV cables is presented in the paper. Some particular HV cable lines and service experiences for a few exemplary countries was described, too.

**Słowa kluczowe:** kable wysokich i najwyższych napięć, doświadczenia eksploatacyjne.

**Keywords:** high- and extra high-voltage cables, service experiences.

### Wstęp

Obserwowany w ostatnich latach wzrost długości eksploatowanych linii kablowych średniego i wysokiego napięcia jest faktem niezaprzeczalnym. Kolejnym faktem, jest zdecydowana dominacja polietylenu jako izolacji kabli elektroenergetycznych na różnych poziomach napięcia. Można stwierdzić, że w tym przypadku Francja jest państwem, które przodowało w Europie we wprowadzaniu i upowszechnianiu izolacji wytłaczanej. We Francji pierwszy kabel na napięcie 63 kV ułożono na początku lat sześćdziesiątych. Kolejne etapy rozwoju, to uruchomienie linii kablowej na napięcie 90 kV w roku 1968, linii na napięcie 225 kV w roku 1969 oraz linii na napięcie 400 kV w roku 1985 [1]. Rozwój ten był możliwy dzięki bardzo szerokim oraz długotrwałym testom, a także bardzo skrupulatnej obserwacji linii po zainstalowaniu i zbieraniu szczególnych doświadczeń eksploatacyjnych, umożliwiających dalszą poprawę technologii i konstrukcji kabli o izolacji polietylenowej. Na koniec roku 2001 we Francji eksploatowano ponad 2.100 km linii kablowych pracujących na napięciu 63 i 90 kV oraz ponad 800 km linii na napięcie 225 kV. Przejście ze stosowania na kablową izolację z polietylenu termoplastycznego o niskiej i wysokiej gęstości na polietylen usieciowany (XLPE) w roku 1987, przyspieszyło dynamiczny rozwój linii kablowych i doprowadziło w końcowym efekcie do wyprodukowania i zainstalowania w roku 1998 kabli na napięcie 400 kV.

Analiza liczby nowobudowanych na całym świecie linii kablowych i ocena ich parametrów (w tym długości i poziomu napięcia) może budzić pewne uczucie zazdrości wśród przedstawicieli polskiej energetyki zawodowej. Wykazywana sumaryczna długość eksploatowanych przez polską energetykę zawodową linii kablowych na napięcie 110 kV wynosi bowiem nadal poniżej 100 km [2, 3].

### Tendencje rozwoju linii kablowych wysokiego napięcia

Ocena tendencji zmian konstrukcji kabli wysokiego napięcia oraz preferowanej tematyki kablowej na najważniejszych światowych konferencjach kablowych prowadzi do wniosku, że zmiany te skupiają się głównie na:

- systematycznym ulepszaniu stosowanych materiałów na wszystkie elementy konstrukcyjne kabla,
- zmniejszaniu grubości izolacji kablowej,
- zamianie litej powłoki metalowej na cienką folię aluminiową,
- powszechnym stosowaniu konstrukcji uszczelnionych,

- zamianie rodzaju napięcia roboczego z przemiennego na napięcie stałe.

Zdecydowanie najczęściej badań poświęcono zmniejszaniu grubości izolacji dla danego poziomu napięcia. W wyniku pocieniania izolacji uzyskiwano zwiększenie natężenia pola elektrycznego w kablowej izolacji. W niektórych latach poprawianie konstrukcji było szczególnie wręcz spektakularne, dzięki wdrażaniu nowych technologii produkcji samego kabla jak i materiałów, głównie izolacyjnych [4]. Stosowaną obecnie najczęściej grubość izolacji kabli elektroenergetycznych w zależności od poziomu napięcia i przekroju żyły roboczej przedstawiono w tablicy 1 [5]. Natomiast na rysunku 1 pokazano jeden z osiągniętych przez fabryki kabli rekordów w dziedzinie produkcji kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia.

Tablica 1. Wybrane konstrukcje kabli o izolacji XLPE według danych z roku 2002

napięcie znamionowe kabla [kV]	przekrój żyły roboczej [mm <sup>2</sup> ]	grubość izolacji [mm]
132	500	14
132	2.000	23
161	500	20
220	1.000	24
220	2.000	24
275	1.600	26
345	1.600	26
400	2.000	25
400	1.600	27
500	1.400	32

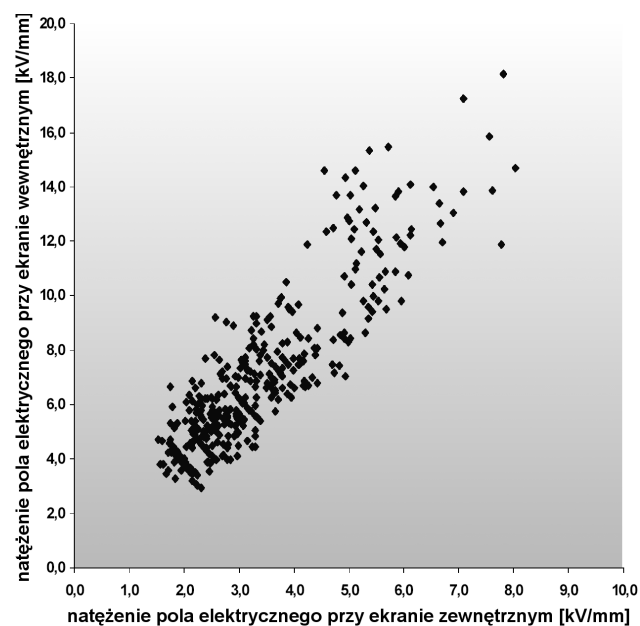
Badania skupiają się nad wyznaczeniem limitu grubości, do której można maksymalnie zmniejszyć warstwę izolacji, aby kabel nadal zapewniał bezawaryjną – w stosunkowo długim okresie czasu – pracę w systemie elektroenergetycznym. Na rysunku 2 pokazano stosowane obecnie wartości natężenia pola elektrycznego w izolacji XLPE kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia [6].

Dotychczas zgromadzone doświadczenia związane z rozwojem i stałym ulepszaniem materiałów oraz procesu technologicznego, a także bardzo pozytywne doświadczenia eksploatacyjne dotyczące kabli XLPE pozwoliły na wysunięcie wniosku, że stosowane grubości izolacji dla poszczególnych poziomów napięć roboczych są znacznie przewymiarowane. W ofercie niektórych fabryk kablowych

pojawiły się kable o pocienionej izolacji. Przykładowo izolację taką zaczęto stosować w kablach na napięcie 132 kV – obniżając grubość izolacji do 10÷12 mm (w zależności od przekroju żyły roboczej). Poza innymi korzystnie zmieniającymi się czynnikami, zmniejszenie grubości izolacji może wpłynąć pozytywnie na obniżenie kosztu produkcji kabli. W ostatnich latach obserwowana jest tendencja zmniejszania się wskaźnika wyrażającego stosunek kosztów budowy linii napowietrznej i równoważnej jej (pod względem zdolności przesyłowych) linii kablowej. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie przekroju kabla o izolacji XLPE standardowej i pocienionej na przykładzie kabli 132 kV [7]. Natomiast na rysunku 4 pokazano kolejne generacje konstrukcji kabli o izolacji XLPE również na przykładzie kabli 132 kV



Rys.1. Układanie linii 500 kV XLPE o długości jednego odcinka 1200 m; szerokość bębna 9 m

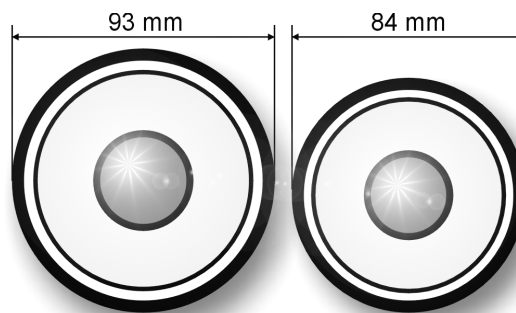


Rys.2. Maksymalne natężenie pola elektrycznego w izolacji kabli WN i NN przy wewnętrznym i zewnętrznym ekranie [wg. 6]

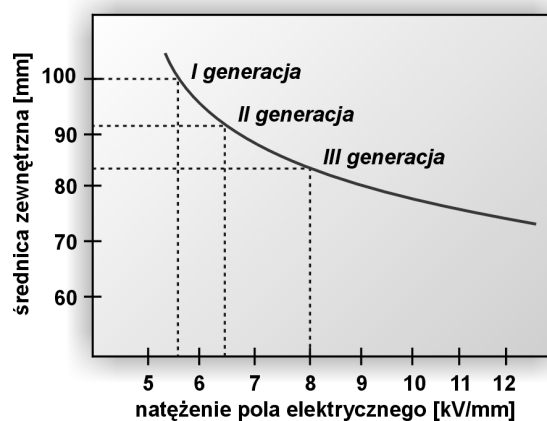
Docelowo zostanie zmniejszona grubość izolacji dla kabli na napięcie 400 kV do warstwy mniejszej niż 25 mm, a dla kabli 500 kV – do warstwy mniejszej niż 27 mm [8]. Również wymagania dotyczące długości odcinków fabrycznych dla kabli WN dążą do uzyskiwania odcinków o długości np. 1.400 m (obecnie około 750-900 m) dla kabli 400 kV o przekrojach żył roboczych 2.500 mm<sup>2</sup>. Planowane

jest uzyskanie odcinków o długości 3.000 m dla tych kabli, lecz o żyłach 1.000 mm<sup>2</sup>.

Dokonana, w ramach prac prowadzonych przez CIGRE, analiza kosztów budowy równoważnych linii napowietrznych i kablowych dla poziomu napięcia 110–200 kV wykazała, że stosunek ten dla kilkunastu państw wynosi średnio 1:7. Koszt ten jednak waha się dość znacznie dla różnych państw i zróżnicowanych warunków instalowania linii. Minimalna wartość to 3,4 – a wartość maksymalna to 17,0. Gdy uwzględni się możliwość zastosowania kabli o zmniejszonej grubości izolacji, to w tym przypadku dla poziomu napięcia 132 kV stosunek ten może wynieść 1:3.



Rys. 3. Porównanie wymiarów kabla 132 kV 630 mm<sup>2</sup> – izolacja standardowa i o zmniejszonej grubości



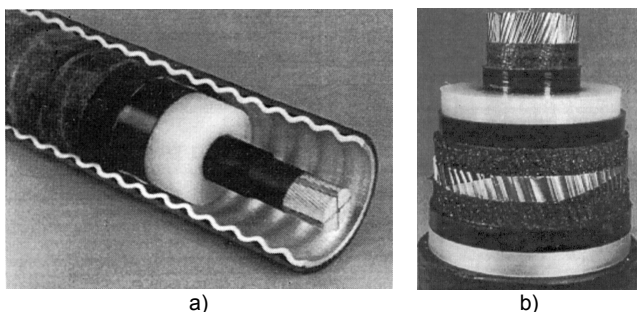
Rys. 4. Porównanie natężenia pola elektrycznego w izolacji kabli 132 kV; III generacja konstrukcji – kable o zmniejszonej grubości izolacji

Powszechne stało się stosowanie tzw. konstrukcji lekkich kabli wysokiego napięcia o izolacji XLPE – czyli zastąpienie litych, o stosunkowo grubej ściance, powłok metalowych folią aluminiową o niewielkiej grubości. Zapowiadane jako nowość, proponowane przez znaczące fabryki kabli [9] konstrukcje stały się standardem dla większości znaczących na rynku kablowym fabryk. Należy zwrócić uwagę, że właśnie ten typ konstrukcji kabli najwyższych napięć produkowany jest już od 1995 r. przez fabrykę kabli w Bydgoszczy. Kable o tzw. konstrukcji lekkiej, w których powłoka metaliczna ma postać folii aluminiowej o grubości 0,1÷0,3 mm „wtopionej” w wytłaczaną polietylenową osłonę [4].

Za zastosowaniem folii aluminiowej jako uszczelnienia promieniowego przemawiają zarówno aspekty techniczne, środowiskowe jak i ekonomiczne – rys. 5. Wśród wielu zalet takich konstrukcji kabli należy przede wszystkim wymienić ich znacznie obniżoną masę, w porównaniu do masy kabli produkowanych z powłokami ołowianymi – stosowanymi

powszechnie w latach ubiegłych. Przykładowo dla kabli na napięciu 132 kV różnica w masie wynosi około 30% [9].

Zgromadzone w wielu krajach, dotychczasowe doświadczenia z eksploatacji linii kablowych o izolacji XLPE, ujawniły wiele zalet tej izolacji. Wykazały jednak, że w przypadku wystąpienia niekorzystnych warunków (zwilgocenie izolacji, miejscowy wzrost natężenia pola spowodowany np. obecnością zanieczyszczenia w izolacji) może nastąpić zainicjowanie i rozwój niekorzystnego zjawiska – znanego powszechnie jako drzewienie wodne. I pomimo, że izolacja z polietylenu usieciowanego posiada bardzo dobre, znacznie przewyższające inne rodzaje izolacji, właściwości eksploatacyjne – to możliwość wystąpienia drzewienia w izolacji wytłaczanej skutkuje tym, że przez niektóre gremia opiniotwórcze ograniczany jest rozwój sieci kablowej o izolacji XLPE.



Rys.5. Kabel o izolacji XLPE: a), na napięciu 220 kV z powłoką aluminiową w postaci grubej wytłaczanej warstwy, b) na napięciu 132 kV z powłoką aluminiową w postaci nawiniętej folii

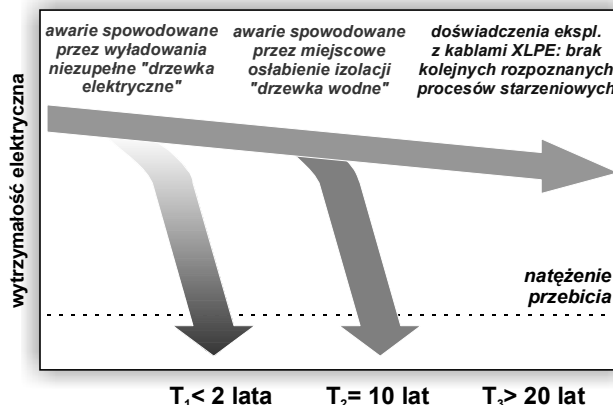
W początkowym okresie wprowadzania izolacji wytłaczanej istniała możliwość znalezienia się zanieczyszczeń w izolacji lub nierówności na powierzchni styku izolacja – ekran półprzewodzący. Tego typu defekty często stawały się zaczątkiem drzewka elektrycznego, rozwijającego się znacznie szybciej niż drzewka wodne, a rozwój ten prowadził do miejscowego osłabienia izolacji i w konsekwencji do jej przebicia. Nowoczesne technologie odsunęły to zagrożenie na bardzo daleki plan. Na rysunku 6 pokazano schematycznie zależność wytrzymałości elektrycznej kablowej izolacji XLPE i czasu pracy kabli z uwzględnieniem wpływu niekorzystnych zjawisk zachodzących w izolacji. Dotychczasowe, optymistyczne doświadczenia z eksploatacji kabli o izolacji XLPE na całym świecie nie ujawniły nowych, poza wymienionymi już poprzednio, zagrożeń eksploatacyjnych dla tego typu izolacji.

Stosowane jako standardowe – konstrukcje uszczelnione wysokonapięciowych kabli elektroenergetycznych – są już regułą w przypadku kabli o izolacji XLPE. Stanowi to, jak zakładano i jak potwierdziły to doświadczenia eksploatacyjne – skuteczną ochronę przed możliwością zawilgocenia izolacji, a w konsekwencji przed możliwością wystąpienia drzewienia wodnego [10].

### Światowe rekordy w dziedzinie kabli wysokiego napięcia

Największą, jak dotychczas, inwestycją kablową w ostatnich latach, jest realizacja Metropolitan Power Project. W ramach tego przedsięwzięcia zbudowano linię kablową na napięciu 420 kV, okalającą stolicę Danii – Kopenhagę. Pierwszy odcinek 22 km kabla 420 kV o izolacji z polietylenu usieciowanego został oddany do eksploatacji w październiku 1997 r. Fabryka dostarczała kable o przekroju

żyły roboczej 1.600 mm<sup>2</sup> w odcinkach o długości 880 m. Na rysunku 7 pokazano zdjęcie, ustawionego na ulicy stolicy Danii, bębna kablowego o rekordowej średnicy 5 m, podczas układania tej linii. Fabryka dostarczała kable o przekroju żyły roboczej 1.600 mm<sup>2</sup> w odcinkach o długości 800-880 m. W całej ułożonej linii (36 km linii północnej oraz 66 km linii południowej) zainstalowano 114 muf oraz 24 głowice. Zdolność przesyłowa zakończonej w roku 2000 linii to 1.000 MVA.



Rys. 6. Zależność wytrzymałości elektrycznej kablowej izolacji od czasu eksploatacji



Rys.7. Bęben kablowy o rekordowej średnicy 5 m ustawiony na ulicy stolicy Danii – układanie kabla 420 kV [11]

Kolejna znacząca inwestycja kablowa – to budowa trzytorowej linii kablowej 500 kV łączącej stację pomp w elektrowni wodnej Tianhuangping w Chinach ze stacją elektroenergetyczną 500 kV, wykonaną w technologii GIS. Ze względu na fakt, że linia na długości 96 m jest ułożona w tunelu pionowym, jako jedyną alternatywę przyjęto kable o izolacji z polietylenu usieciowanego. Dodatkowo za tym rozwiązaniem przemawiały: mniejsze straty dielektryczne w izolacji XLPE niż w izolacji papier+olej (ang. OF – oil-filled cable) oraz zdecydowanie wyższa odporność konstrukcji kabla XLPE niż kabla OF na działanie płomieni. Dane charakteryzujące tę instalację: linia trzytorowa (w każdej 3x kabel 1-fazowy) o długości 219 m, 222 m i 256 m; zakładana temperatura otoczenia w normalnych warunkach pracy  $-14 \div +40^{\circ}\text{C}$ ; napięcie maksymalne 550 kV, wytrzymałowe napięcie udarowe normalne 1.675 kV<sub>m</sub>; napięcie udarowe łączeniowe 1.240 kV<sub>m</sub>; żyła robocza 800 mm<sup>2</sup> (Cu), prąd zwarciový trójfazowy 50 kA przez 3 s;

prąd zwarciovowy jednofazowy 40 kA przez 2 s; prąd znamionowy 873 A (756 MVA/tor), a przy starcie pomp (elektrownia wodna) 890 A (770 MVA). Grubość izolacji równą 35 mm przyjęto ze względu na warunki przepięciowe podczas pracy linii kablowej [12].

Wśród standardowych, zakopanych w gruncie linii kablowych, w chwili obecnej jedną z kolejnych, największych inwestycji kablowych było uruchomienie pod koniec 2000 roku dwutorowej linii kablowej 500 kV, łączącej stację elektroenergetyczną Shin-Toyosu w centrum Tokio ze stacją Funabashi na wybrzeżu. Łączna długość linii wynosi 40 km. Realizację tego projektu rozpoczęto już w marcu 1996 r. i zakończono ułożeniem kabla o przekroju  $2.500 \text{ mm}^2$  Cu, o izolacji XLPE [13]. Na terenie Japonii pracuje obecnie już kilka linii kablowych 500 kV, głównie zasilających stacje pomp w elektrowniach wodnych.

Pod koniec roku 2003 zostanie uruchomiona linia kablowa na napięcie 400 kV, ułożona w Madrycie. Kolejnym krokiem w rozwoju kabli wysokiego napięcia jest wykorzystanie w tej linii kabli z żyłą roboczą o przekroju  $2.500 \text{ mm}^2$ . Oczywiście izolację kabla stanowi polietylen usieciowany.

### Doświadczenia eksploatacyjne

W danych prezentowanych przez francuską energetykę analizowano 230 uszkodzeń w liniach kablowych na napięcie 63–90 kV; od momentu zamontowania pierwszego kabla z izolacją syntetyczną do roku 1994 r. Z zanotowanych uszkodzeń aż 80% zakwalifikowano jako spowodowane błędami fabrycznymi oraz montażowymi powodującymi szkodliwe zjawiska w układzie izolacyjnym kabli lub osprzętu. Głównie jednak były to uszkodzenia kabli tzw. pierwszej generacji – czyli produkowane w latach pomiędzy 1978 a 1986. Wśród uszkodzeń osprzętu na pierwsze miejsce wysunęły się nieszczelności i wyciek oleju lub  $\text{SF}_6$  z elementów osprzętu kablowego. Natomiast w liniach na napięcie 225 kV do roku 1994 stwierdzono tylko 20 awarii, z których 70% wynikało z przyczyn zewnętrznych (uszkodzenia mechaniczne), 20% z powodu zawilgocenia izolacji. W linach tych 50% uszkodzeń głowic spowodowanych zostało wyciekami gazu, a 20% w wyniku błędnego montażu osprzętu. Natomiast uszkodzenia muf przed wszystkim (50%) wynik błędów montażowych, i aż w 40% z powodu przyczyn niewyjaśnionych. Tylko 10% awarii muf nastąpiło w wyniku uszkodzenia mechanicznego. W sieci kablowej eksploatowanej na terenie Francji – zanotowano dwa przypadki awarii linii 400 kV – oba te przypadki zakwalifikowano jako wynikające z działania mechanicznego – każdy z nich wystąpił kilka tygodni po oddaniu kabla do eksploatacji [4]. Należy jednak przypominąć, że dotyczyło to głównie kabli produkowanych w pierwszych latach wprowadzania kablowej izolacji wytłaczanej.

Znacznie nowsze doświadczenia japońskie z eksploatacji elektroenergetycznych kabli o izolacji XLPE pracujących na napięciu 66–275 kV pozwoliły na sformułowanie pewnych wniosków. W okresie długoletniego eksploataowania tych kabli zaobserwowano niewielką liczbę ich awarii. Jak wynika z zestawionych danych, ponad 85% wszystkich uszkodzeń powstaje podczas prób odbiorczych lub podczas pierwszych trzech lat eksploatacji. Dowodzi to jasno, jak silny jest wpływ procedury pomiarów odbiorczych, wysokości i rodzaju napięcia oraz sposobu jego przykładania. Około 75% uszkodzeń powstało w osprzęcie kabli WN. Podobne doświadczenia uzyskano w Izraelu – i w tym kraju 4 na 5 zanotowanych uszkodzeń ujawniło się podczas prób odbiorczych lub w pierwszych chwilach standardowej pracy kabla. Jeden tylko z zaobserwowanych przypadków awarii linii kablowych WN stwierdzono po

upływie półrocznej eksploatacji – a wszystkie zarejestrowane awarie miały związek z uszkodzeniem muf kablowych wysokiego napięcia [4]. Wielokrotnie wykazywano, że konieczne jest badanie stanu izolacji wysokonapięciowych kabli, lecz badanie to nie może stwarzać zagrożenia dla niezawodnej pracy gotowego kabla czy linii kablowej. Konieczne jest także znalezienie metody przenoszenia ocen uzyskiwanych na podstawie przyspieszonych badań (np. starzeniowych) prowadzonych w laboratoriach naukowych – na układy eksploatowane w warunkach rzeczywistych.

### Podsumowanie

Nowe osiągnięcia w rozwoju konstrukcji kabli elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć dotyczą rozwoju kabli o izolacji z polietylenu usieciowanego. Dotychczasowe doświadczenia dotyczące eksploatacji kabli o izolacji XLPE wysokiego i ekstra wysokiego napięcia wskazują bowiem na ich wysoką niezawodność pracy w systemie elektroenergetycznym. Dlatego kolejne prace naukowo-badawcze dotyczą głównie modyfikowania konstrukcji i technologii, w celu dostosowania opracowywanego kabla elektroenergetycznego do coraz trudniejszych warunków pracy oraz do uzyskiwania coraz wyższych mocy przesyłowych i minimalizacji wymiarów – przy zachowaniu wysokiej niezawodności działania.

### LITERATURA

- [1] Lesur F., Maugain Y., Argaut P., New technical solutions to improve the impact of HV/VHV lines on the environment, *CIGRE*, Session 2002, paper 21-109
- [2] Rakowska A., Stosowanie żył miedzianych w kablach na napięcie 110 kV i wyższe, *IX Konferencja Techniczna KABEL'2002*, Zakopane, 26 lutego - 1 marca 2002
- [3] Statystyka elektroenergetyki polskiej 2001, Agencja Rynku Energii SA, Warszawa, 2002
- [4] Rakowska A., Rozwój kabli wysokiego napięcia oraz ocena ich awaryjności na podstawie krajowych i europejskich doświadczeń eksploatacyjnych, *X Konferencja KABEL'2003*, Szklarska Poręba, 11-14 marca 2003
- [5] Bostrom J-O., Campus A., Hampton RN., Reliable HV and EHV XLPE cables, *CIGRE*, Session 2002, paper 21-105
- [6] Crine J-P, Future R&D needs and development for HV cables, *IEEE Intern.Symp.on Electrical Insulation*, Boston, MA USA, April 7-10, 2002, paper 3-1
- [7] ABB Review 4/2000
- [8] Pohler S., Bisleri C., Schroth R.G., EHV XLPE cables, experience, improvements and future aspects, *CIGRE*, Session 2000, paper 21-104
- [9] Ford A., Gregory B., Technological advances in reliable HV XLPE foil laminate cable system, *Jicable* 1999, paper A-2.6
- [10] Rakowska A., Kryteria weryfikujące jakość polietylenu usieciowanego stosowanego jako izolacja kabli elektroenergetycznych, *Wydawnictwo PP, seria Rozprawy nr 357*, sierpień 2000 r.
- [11] NKT, Metropolitan Power Project, 420 kV Cable line in Kopenhaga, 2000
- [12] H.Yongquan, T.Ishibashi, K.Yamamoto, T.Yoneda, 500 kV Aluminium-Sheathed XLPE Cable in a 96 m Vertical Shaft, *Hitachi Cable Review*, No.18, October 1999
- [13] Obki Y., Yasufuku S., The world's first long-distance 500 kV XLPE cable line, *IEEE Magazine*, Vol. 18, No 2, March/April 2002

**Autorka:** dr hab. inż. Aleksandra Rakowska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, e-mail: [aleksandra.rakowskai@put.poznan.pl](mailto:aleksandra.rakowskai@put.poznan.pl)