

Aktualne uwarunkowania normowe w projektowaniu słupów wysokiego napięcia. Badania słupów 220 kV

Dr inż. Anna Stankowska, PBE Elbud Warszawa Sp. z o.o, mgr inż. Robert Czyż, mgr inż. Piotr Wojciechowski, Elbud-Projekt Warszawa Sp. z o.o.

1. Aktualne uregulowania normowe dotyczące projektowania słupów WN

Do roku 2006 jedyną obowiązującą normą stosowaną w procesie projektowania elektroenergetycznych linii napowietrznych wysokich napięć (powyżej 110 kV) była norma PN-E-5100 [1]. Norma ta była cyklicznie nowelizowana (1958, 1962, 1967, 1975, 1998) w pewnym zakresie, obejmującym głównie wymagania elektryczne, zmiany jednostek normowych, zasady obliczania obciążeń klimatycznych oraz metodę wymiarowania konstrukcji. Nie ulegały natomiast zmianie zasady ustalania kombinacji obciążeń obejmujących oddziaływania takich czynników, jak: wiatr i sadź na przewodach oraz sił pochodzące od naciągu przewodów. Podstawową wadą tej normy był brak uwzględnienia parcia wiatru na przewody z sadyż (naciąg podstawowy przy temperaturze -5°C). Parcie to uwzględniano wyłącznie w temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$ (brak sadyż, naprężenia w przewodach znacznie mniejsze niż przy naciągu podstawowym). Ponadto, wszystkie obciążenia analizowane były wyłącznie w dwóch kierunkach: równoległym i prostopadłym względem osi linii (na załomach linii względem dwusiecznej kąta załomu), bez uwzględnienia wiatrów wiejących pod dowolnym kątem. Zrywanie przewodów dla słupów mocnych uwzględniano jedynie w temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$, gdy naprężenia w przewodach były

znacznie mniejsze niż w warunkach sadyżowych. W normie [1] określano dwa rodzaje sadyżi: normalną i katastrofalną. Przy wymiarowaniu konstrukcji uwzględniano sadyż normalną, dwukrotnie mniejszą niż sadyż katastrofalną. Sadyż katastrofalną uwzględniano przy określaniu odległości elektrycznych.

W 2005 roku pojawiła się norma PN-EN 50341-1 [2], a w roku 2006 powstał pierwszy projekt NNA (zbiór normatywnych warunków krajowych) dla Polski pr-PN-EN 50341-3-xx [3], który został ostatecznie wprowadzony w życie w 2010 roku pod nazwą PN-EN 50341-3-22 [4].

Zasadnicze różnice w podejściu do projektowania według norm PN-EN [2] i [4] względem PN-E [1] polegają między innymi na wprowadzeniu dodatkowych kombinacji obciążeń, zmianie sposobu obliczania długości wyboczeniowych profili stalowych, ograniczeniu smukłości prętów.

W dodatkowych kombinacjach obciążeń uwzględniono m.in. [2, 4]:

- zwiększenie wartości obciążeń sadyżowych (znaczna część obliczeń konstrukcyjnych i elektrycznych jest wykonywana dla charakterystycznego obciążenia sadyż – dawniej obciążenia sadyż katastrofalną);
- obciążenie przewodów sadyż z jednoczesnym obciążeniem wiatrem konstrukcji i przewodów o średnicy powiększonej o wielkość sadyżi;
- nierównomierne odpadanie sadyżi z poszczególnych przewodów lub nierównomierne obciążenie sa-

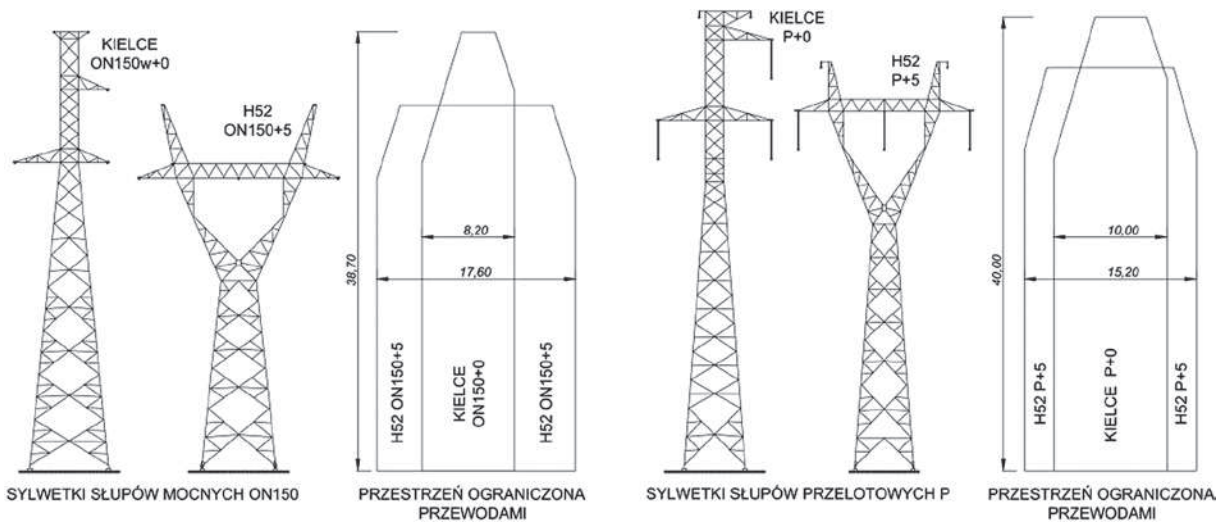
dzia przewodów z różnych stron słupa powodujące zginanie poprzeczne, zginanie wzdłużne oraz zginanie ze skręcaniem konstrukcji słupa;

- zrywanie przewodów w temperaturze -5°C z jednoczesnym obciążeniem sadyż pozostałych przewodów;
- zwiększenie wartości obciążeń wiatrowych;
- oddziaływanie wiatru pod różnymi kątami względem linii.

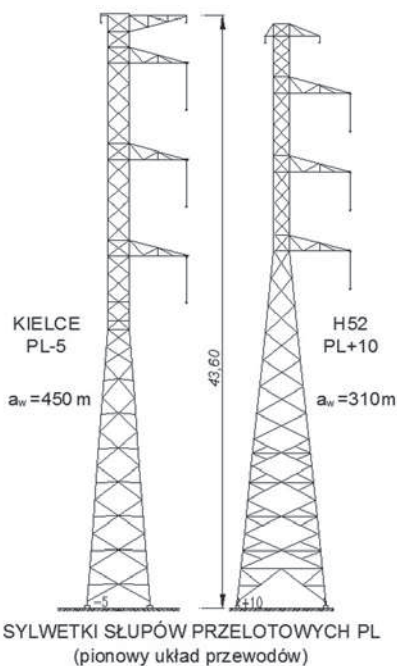
Smukłość prętów z wartości 250 (bez względu na funkcję pręta) ograniczono do wartości: 120 (krawężniki), 200 (zakratowanie główne) lub 240 (zakratowanie drugorzędne).

Do marca 2010 r. słupy projektowano zgodnie z PN-B-03200: 1990 i PN-B-03205:1996.), od kwietnia 2010 r. zaleca się projektowanie stalowych słupów kratowych zgodnie z tzw. Eurokodami PN-EN 1993-1-1:2006 i PN-EN 1993-3-1:2006.

Wszystkie wymienione zapisy skutkują znacznym poprawieniem bezpieczeństwa pracy linii przy jednoczesnym wzroście ciężaru projektowanych konstrukcji słupów od 10 do 40% w zależności od typu linii, rodzaju słupa, regionu kraju oraz zastosowanego napięcia roboczego. Spowodowało to jednocześnie wzrost gabarytów fundamentów, co przełożyło się na wzrost kosztów zaprojektowania i wybudowania linii. Dodatkowo nastąpiło odejście od sylwetek słupów typu „Y” (płaski układ przewodów fazowych) na rzecz sylwetek z trójkątnym układem przewodów. Znacznie zawęża to teren zajmowa-



Rys. 1. Porównanie gabarytów słupów typu ON150 i P serii Kielce i serii H52



Rys. 2. Porównanie gabarytów słupów typu PL serii Kielce i serii H52

ny przez linię elektroenergetyczną, co jest istotne z uwagi na konieczność wypłat odszkodowań właścicielom gruntów, na których planuje się lokalizację linii.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono porównanie gabarytów słupów serii H52 zaprojektowanej na podstawie starej normy [1] i serii słupów linii Kielce – Radkowiec projektowanej na podstawie nowych norm [2, 4]. Porównanie ciężarów analizowanych słupów serii Kielce i H52 zestawiono w tabeli 1. Na uwagę zasługuje

fakt, że nowe normy [2, 4] (i obecne wymagania technologiczne) wymusiły zwiększenie wysokości słupa podstawowego o kilka metrów. Wymiar ten wynika między innymi z konieczności zachowania minimalnych odległości przewodów fazowych od ziemi.

Aktualnie obowiązującą praktyką przy projektowaniu nowych linii napowietrznych jest stosowanie norm PN-EN [2] i [4], a przy przebudowach poszczególnych pręseł dla istniejących linii – normy PN-E [1] i PN-B [7], [8]. Przy przebudowach istniejących linii często o długościach sięgających kilkudziesięciu kilometrów ekonomicznie nieuzasadnione jest stosowanie norm [2] i [4] dla odcinków o długościach kilkuset metrów.

W chwili obecnej na ukończeniu jest proces legislacyjny normy EN-50341-1:2012 [5], której wejście w życie planowane jest latem 2012 r. Norma ta ma obowiązywać we wszystkich

krajach Unii Europejskiej oraz Norwegii i Szwajcarii, a przewidywany termin ukończenia załączników krajowych (NNA [6]) dla wszystkich krajów to połowa 2013 roku. Wprowadzenie jej ma na celu zharmonizowanie procesów projektowania napowietrznych linii energetycznych z wymaganiami Eurokodów EC i ujednolicenie tego procesu we wszystkich krajach UE.

Podstawowymi zmianami wprowadzonymi normą [5] w stosunku do normy [2] są:

- zmiana zakresu stosowania normy – ma ona obowiązywać dla wszystkich linii napowietrznych powyżej 1 kV (dotychczas powyżej 45 kV),
- zmiana wartości obciążeń klimatycznych (wiatr, śnieg),
- zmiana sposobu obliczania obciążeń konstrukcji słupa i przewodów wiatrem,
- dalsze zaostrzenie dopuszczalnych smukłości dla prętów zakratowania głównego do wartości 180,

Tabela 1. Porównanie słupów jednotorowej linii 220kV

Seria Kielce			Seria H 52			
Typ słupa	H1 [m]	G1 [t]	Typ słupa	H2 [m]	G2 [t]	G1/G2
M3+0	27,2	10,4	M3+5	25,8	8,6	1,2
P+0	30,9	7,1	P+5	31,7	5,0	1,4
PL-5 a _w =450	25,9	8,8	PL+10 a _w =310	26,3	6,0	1,45

H1, H2 – wysokość słupa do dolnych poprzeczników
G1, G2 – masa słupa
a_w – długość przęsła wiatrowego [m]

- zmiana sposobu obliczania długości wybożeniowych profili stalowych,
- konieczność wymiarowania elementów konstrukcji zgodnie z odpowiednimi EC, a w szczególności fundamentów zgodnie z wymaganiami EC7,
- możliwość przyjęcia zastosowania „łagodniejszych formuł obliczeniowych” w przypadku wykonywania prób wytrzymałościowo-zniszczeniowych konstrukcji słupów w skali 1:1.

Każdy z krajów ma możliwość zmiany pewnych zapisów „normy matki” [5] w swoim NNA [6]. Zmiany te często dostosowują kombinacje obciążeń do lokalnych warunków klimatycznych lub związanych z technologią montażu. W Wielkiej Brytanii dodatkowo oblicza się konstrukcje słupa pokrytą warstwą sadzi, co nie jest wymaganiem [2] i [5], w Polsce słupy odporowo-naróżne sprawdza się natomiast dla schematu 2/3 jednostronnych naciągów, itd. NNA dla każdego kraju posiada indywidualny numer – dotychczas EN-50341-3-nn, od 2012 roku EN-50341-2-nn, gdzie nn jest kodem kraju (np. 9 dla Wielkiej Brytanii, 22 dla Polski). Zmiany w NNA nie mogą jednak pogorszyć zapisów dotyczących bezpieczeństwa konstrukcji – można w NNA np. ograniczyć smukłość krawężników do 80, ale nie można jej zwiększyć do 200 (minimalny zapis „normy matki” to 120).

Wspomniane zabiegi mają na celu zwiększenie pewności oraz bezpieczeństwa projektowanych i nowo budowanych linii w trakcie ich długoletnich (minimum 50 lat) eksploatacji. Spowodują one jednak dalszy wzrost kosztów budowy linii elektroenergetycznych.

2. Badania wytrzymałościowo-zniszczeniowe serii słupów linii 220 kV Kielce Radkowiec

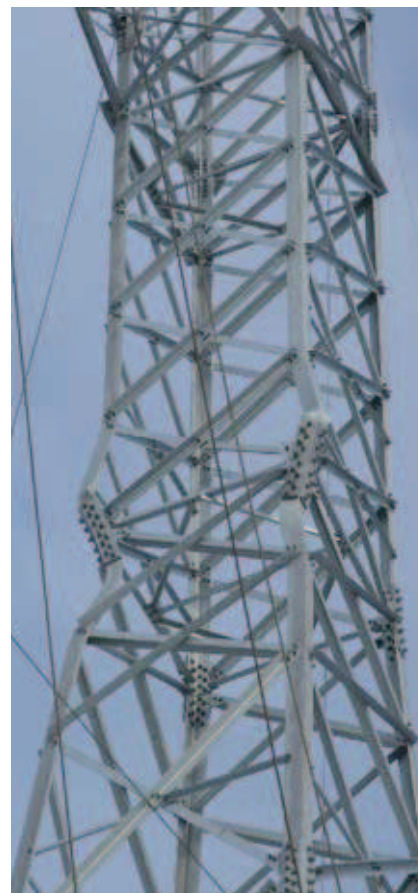
W okresie listopad 2011 – luty 2012 przeprowadzono, na poligonie badawczym w Żylinie (Słowacja), badania wytrzymałościowo-zniszczeniowe trzech modeli słupów 220 kV – w skali 1:1 – przeznaczonych dla nowo



Fot. 1. Sylwetka zniszczonego słupa typu PL

projektowanej linii napowietrznej relacji Kielce – Radkowiec, zaprojektowanych w oparciu o PN-EN [2] i [4]. Były to słupy typu P, PL, M3. W trakcie prac projektowych nad słupami opracowano tzw. „drzewa obciążeń” dla poszczególnych typów słupów, obejmujące 33 (dla słupa M3) lub 26 (dla słupa P i PL) różnych kombinacji obciążeń dla zwymiarowania stanów granicznych nośności (SGN – ULS) i stanów granicznych użyteczności (SGU – SLS). Obliczenia słupów przeprowadzono Metodą Elementów Skończonych za pomocą programu komputerowego ARSAP.

Badania wykazały, że ugięcia rzeczywiste pod wpływem kombinacji SLS były zbliżone do ugięć wyliczonych metodami komputerowymi. Różnica ugięć pomiędzy obliczonymi komputerowo, a pomierzonymi w trakcie prób wynosiła 5–12%. Zniszczenie słupów nastąpiło na poziomie obciążeń pomiędzy 140 i 150% dla kombinacji ULS, a zniszczeniu ulegały elementy



Fot. 2. Fragment zniszczonej konstrukcji

wytypowane na etapie analizy komputerowej konstrukcji. W przypadku słupa przelotowego leśnego (PL) było to połączenie kolumny z trzonem słupa, natomiast w słupie mocnym (M3) – rejon dolnego zamocowania słupa. Biorąc pod uwagę rzeczywiste wartości wytrzymałościowe zbadanych próbek stalowych, wynik ten jest prawidłowy i potwierdza poprawność wykonanych obliczeń. Średni stosunek wytrzymałości próbek badanych względem wytrzymałości obliczeniowej R_{eL}/f_d dla stali S235 wynosił 1,53, a dla stali S355 wynosił 1,42. Więcej informacji dotyczącej analizy badań wytrzymałościowo-zniszczeniowych zawarto w opracowaniu [12].

Sposób zniszczenia słupa PL, na poligonie badawczym w Żylinie, pokazano na fotografiach 1–2.

3. Wnioski

- Wprowadzone w ostatnim okresie czasu zmiany normowe doty-

czące projektowania napowietrznych linii elektroenergetycznych spowodowały znaczną rewolucję w procesie ich projektowania. Zmianie uległy nie tylko wartości obciążeń klimatycznych, ale przede wszystkim rozszerzono kombinacje obciążeń, dla których należy wymiarować konstrukcje słupów. Zmieniono również zasady wymiarowania wprowadzając obowiązek stosowania Eurokodów.

- Wprowadzone nowe kombinacje obciążeń są odzwierciedleniem rzeczywistych warunków pracy konstrukcji.
- Wprowadzone zmiany normowe spowodowały zwiększenie ciężaru słupów o 10–40% (średnio dla linii o około 20–25%) oraz gabarytów fundamentów, co bezpośrednio przekłada się na wzrost kosztów budowy nowych linii napowietrznych.
- Wprowadzenie norm PN-EN [2] i [4], i ich planowane w latach 2012 i 2013 [5] i [6] zmiany, wpływają znacząco na poprawę bezpieczeństwa nowo projektowanych i nowo bu-

dowanych linii elektroenergetycznych.

- Przeprowadzanie prób wytrzymałościowo-zniszczeniowych nowo projektowanych słupów pozwala zweryfikować poprawność ich zaprojektowania i wykonania. W przyszłości wpłynie to również na możliwość racjonalniejszego wykorzystania nośności elementów i obniżenia ciężaru konstrukcji słupów.
- Ze względu na minimalizację ryzyka związanego z możliwością wystąpienia awarii lub katastrofy linii, ekonomicznie uzasadnione staje się badanie serii słupów dla linii o dużych długościach, zwłaszcza dla najczęściej stosowanych słupów typu P, ON150, ON120, PL.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-E-05100-1 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa
- [2] PN-EN-50341-1 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne
- [3] pr.PN-EN-50341-3-xx Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego

powyżej 45 kV. Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych

- [4] PN-EN-50341-3-22 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych. (NNA dla Polski)
- [5] pr.EN-50341-1:2012 Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV Part 1: General requirements – Common specifications.
- [6] NNA dla Polski do normy [5] – w przygotowaniu
- [7] PN-B-03200:1990 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [8] PN-B-03205:1996 Konstrukcje stalowe. Podpory linii elektroenergetycznych. Projektowanie i wykonanie
- [9] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, z poprawkami
- [10] PN-EN 1993-3-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 3-1: Wieże, maszty i kominy – Wieże i maszty, z poprawkami
- [11] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne, z poprawkami
- [12] Analiza porównawcza nośności wyznaczonych na podstawie norm PN-B/PN-E i PN-EN oraz badań w skali rzeczywistej słupów kratowych linii elektroenergetycznych (P. Lewiński, R. Czyż, P. Wojciechowski)

**Zaprawy Techniczne
dla budowli inżynierskich**

P&T
Zaprawy Techniczne

HUFGARD POLSKA Sp. z o.o.
42-209 Częstochowa, ul. Rząsawska 40 • tel. +48 34 360 46 94, fax +48 34 360 46 98
www.hufgard.pl, e-mail: biuro@hufgard.pl