

nictwa energetycznego służą m.in. specjalistyczne konferencje i sympozja, wśród których cykliczne konferencje naukowo-techniczne „Budownictwo w Energetyce” znajdują szczególnie ważne miejsce. W maju 2010 r. odbędzie się w Złotnikach Lubańskich kolejna VII Konferencja „Budownictwo w Energetyce”, w której weźmie udział wielu doświadczonych specjalistów z całej Polski. Wybrane zagadnienia, dyskutowane na tej konferencji, są opublikowane w numerze majowym miesięcznika „Przegląd Budowlany”. Należy

mieć nadzieję, że nadal konferencja ta będzie w następnych latach jedną z najważniejszych imprez naukowo-technicznych, dotyczących szeroko rozumianych problemów budownictwa energetycznego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kiernicki J., Bałuka G., Energia wiatru jako szczególne źródło energii odnawialnej. *Energetyka* 10/2009
 [2] Szczygiał L., Meandry europejskiej polityki energetycznej. *Energetyka* 5/2008
 [3] Hotała E., Rykaluk K., Zagrożenia awaryjne stalowych konstrukcji obiektów energetycznych po modernizacji. *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki*

- Wrocławskiej nr 90 „Budownictwo w Energetyce”, Wrocław 2008
 [4] Hotała E., Rykaluk K., Problemy trwałości stalowych konstrukcji w zmodernizowanych obiektach energetycznych. „Przegląd Budowlany” 5/2010
 [5] Rakowska A., Grzybowski A., Stiller J., Czy grożą nam awarie systemowe wywołane zjawiskami klimatycznymi? *Energetyka* 7/2009
 [6] Paczkowska T., Paczkowski W., Zniszczenie słupów elektroenergetycznych jako jedna z przyczyn blackout'u szczecińskiego 2008. „Przegląd Budowlany” 5/2010

Zniszczenie słupów elektroenergetycznych jako jedna z przyczyn blackout'u szczecińskiego 2008

Dr inż. Teresa Paczkowska, dr inż. Wiesław Paczkowski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

1. Blackout szczeciński 2008

W nocy z 7 na 8 kwietnia 2008 r. doszło w Szczecinie i okolicy do blackout'u, czyli sytuacji, kiedy na skutek zaniku dostaw energii elektrycznej istotnym ograniczeniem uległo życie na znacznym terenie zamieszkałym przez dużą liczbę ludności.

Zniszczenia mechaniczne konstrukcji wsporczych wraz z błędami popełnionymi w zarządzaniu funkcjonowaniem systemu zasilania doprowadziły do blackout'u trwającego dla większości dotkniętych nim mieszkańców około 18 godzin. Objął on swym zasięgiem ponad 500 tys. mieszkańców na obszarze około 1200

km². Sprawne zarządzanie kryzysowe i względnie krótki czas trwania blackout'u pozwoliły na uniknięcie znaczących strat ekonomicznych i społecznych. Niemniej, zaistniała skala wydarzenia i potencjalnie groźne skutki, jakie mogło ono wywołać spowodowały, iż zostały przeprowadzone szczegółowe prace eksperckie, w wyniku których ustalono przyczyny blackout'u, a także zaproponowano podjęcie szeregu działań mających w przyszłości wyeliminować lub ograniczyć możliwość zaistnienia takich zdarzeń. Opisywana awaria była przedmiotem pracy kilku zespołów, przy czym zajmowały się one przede wszystkim aspektami elektroenergetycznymi. Podsumo-

waniem tych prac był raport Zespołu ds. Zbadania Przyczyn i Skutków Katastrofy Energetycznej [11] powołanego przez wojewodę zachodniopomorskiego.

2. Uszkodzenia mechaniczne słupów wsporczych

Bezpośrednią przyczyną awarii systemu elektroenergetycznego w nocy z 7 na 8 kwietnia 2008 r. były nietypowe dla województwa zachodniopomorskiego warunki atmosferyczne.

Warunki te sprzyjały występowaniu intensywnych opadów początkowo w postaci deszczu, później deszczu ze śniegiem i śniegu o dużej wilgotności. Temperatura od 0 do 1,5 °C

na poziomie gruntu spadała do około $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ już od kilkunastu metrów nad gruntem, co powodowało, że padający o dużym ciężarze śnieg nawarstwiał się na znajdujących się wyżej przedmiotach i urządzeniach. Przeważał wiatr z sektora północnego wiejący ze średnią prędkością od 1 m/s do 7 m/s w okolicach Szczecina i Goleniowa, wzrastającą w godzinach wieczornych do 10 m/s – 11 m/s , lokalnie w okolicach Świnoujścia do 13 m/s . Jednostajne opady śniegu i śniegu z deszczem występowały do godzin rannych dnia 8 kwietnia. Pomierzona grubość pokrywy śnieżnej na gruncie o godz. 6 UTC dnia 8 kwietnia była zróżnicowana. Największą grubość odnotowano w okolicach Goleniowa 23 cm , ale już w granicach miasta Szczecina (Dąbie, Podjuchy) grubość ta wynosiła $4\div 6\text{ cm}$. Ekstremalne wartości pokrywy śnieżnej podane przez IMiGW to grubość 27 cm i ciężar $2,1\text{ kN/m}^2$, co daje ciężar objętościowy:

$$\gamma = 2,1/0,27 = 7,8\text{ kN/m}^3$$

Za istotną dla oceny grubości sadzi, jaka mogła wystąpić krytycznej nocy na przewodach przyjęto wartość $s = 3,0\text{ cm}$ [1].

Praca niniejsza dotyczy wyłącznie uszkodzeń, które wystąpiły w konstrukcjach wsporczych linii wysokich napięć (WN). Na obszarze dotkniętym katastrofą uszkodzenia linii średnich napięć (SN) wystąpiły na długości około 42 km , przy czym liczba połamanych słupów SN wynosiła około 400 szt.

Liczba uszkodzonych mechanicznie lub zniszczonych słupów WN wyniosła 41 . Nie uwzględniono uszkodzeń linii spowodowanych czynnikami pozakonstrukcyjnymi. Znaczny wpływ czasu, jaki nastąpił między samą katastrofą a uzyskaniem przez autorów realnych możliwości działań, a także ekstremalnie trudne warunki dotarcia do niektórych fragmentów linii 220 kV Morzyczyn – Police spowodowały,

Tabela 1. Liczba uszkodzeń konstrukcji wsporczych w zależności od rodzaju uszkodzenia

Rodzaj uszkodzenia	Linie		Liczba uszkodzeń
	220 kV (1)	110 kV (5)	
Przewrócenie słupa	2	1	3
Złamanie trzonu słupa	14	6	20
Skręcenie trzonu	–	6	6
Uszkodzenia poprzeczników ze światłowodem	–	8	8
Uszkodzenia poprzeczników bez światłowodu	–	3	3
Inne	1	–	1
Liczba uszkodzeń	17	24	41

Tablica 2. Liczba uszkodzeń konstrukcji wsporczych w zależności od rodzaju słupów

Seria słupów	Napięcie [kV]	Typ słupa				Liczba uszkodzeń
		P	ON100	ON150	K	
M52	220	14	2	1	–	17
S185	110	3	–	–	–	3
S12	110	14	–	–	–	14
HL52	110	1	–	–	–	1
OS24	110	4	–	1	–	5
KTn	110	–	–	–	1	1
Liczba uszkodzeń		36	2	2	1	41

gdzie:

P – słupy przelotowe,

ON100 – słupy odporowo-naróżne o kącie załomu od 100° ,

ON150 – słupy odporowo-naróżne o kącie załomu od 150° ,

K – słupy krańcowe.

że nie udało się zgromadzić niezbędnego zestawu in situ danych, które mogłyby posłużyć do przygotowania szczegółowej ekspertyzy technicznej. Dodatkowym utrudnieniem były kompetencyjne niejasności związane z udostępnieniem dokumentacji technicznej uszkodzonych słupów, co przy ograniczeniach czasowych i kadrowych uniemożliwiło wykonanie szczegółowych analiz konstrukcyjno-wytrzymałościowych.

W tabeli 1 zestawiono ilościowo przypadki zniszczeń konstrukcji wsporczych w zależności od ich rodzaju oraz napięcia linii WN.

W tabeli 2 dokonano natomiast ilościowego zestawienia uszkodzeń w zależności od serii i typów słupów.

Na podstawie liczb podanych w tabeli 2 wyraźnie widać domina-

cję zniszczeń w dwóch seriach słupów M52 i S12, przy czym zgodnie z założeniami projektowymi stosowanymi w każdej serii, największą podatność na zniszczenia wykazały słupy przelotowe. 14 zniszczonych słupów przelotowych serii M52 na linii 220 kV Morzyczyn – Police to skutek inicjacji zniszczenia od słupa odporowo-naróżnego 123. Słup, który z założenia służyć miał zlokalizowaniu uszkodzeń mechanicznych linii po jednej z jego stron, sam zainicjował zniszczenia, które rozprzestrzeniły się w obu kierunkach. Kolejny słup odporowo-naróżny 130 nie powstrzymał kaskadowego zniszczenia słupów przelotowych, które zatrzymały się dopiero na słupie 136 zamykającym drugą sekcję licząc od słupa inicjującego katastrofę. Na drugim kierunku znisz-



Rys. 1. Kaskadowe zniszczenie słupów przelotowych linii 110 kV Morzyczyn – Łobez (słupy 75–73) o wysokiej regularności formy zniszczenia. Widok w kierunku Morzyczyna. W głębi począwszy od słupa 72 brak uszkodzeń. Z prawej strony linia 400 kV Krajnik – Dunowo bez uszkodzeń



Rys. 2. Kaskadowe zniszczenie słupów przelotowych 124÷129 na linii 220 kV Morzyczyn – Police

Przeanalizowano pracę konstrukcji słupa pod obciążeniami normowymi sędzią według wytycznych obowiązujących w latach siedemdziesiątych [6], a także w latach dziewięćdziesiątych [8]. We wszystkich przypadkach elementy konstrukcji słupa zachowują duży zapas nośności, a przemieszczenie UY wierzchołka słupa jest znikome. Na tej podstawie stwierdzono, że konstrukcja słupa została zaprojektowana zgodnie z założeniami normowymi w odniesieniu do przyjętej funkcji słupa przelotowego. W tabeli 3 przedstawiono porównanie stanów wyężenia.

4. Mechanizm zniszczenia słupa przelotowego

Zjawisko kaskadowego niszczenia słupów przelotowych w czasie poważnych awarii linii występuje stosunkowo często, gdyż słupy przelotowe nigdy nie są projektowane na znaczne siły działające wzdłuż linii. Regularny charakter kaskadowych zniszczeń słupów

zniszczenia zatrzymały się na końcu pierwszej sekcji (słup 119).

Dużą liczbę uszkodzeń słupów przelotowych serii S12 należy kojarzyć z faktem, iż słupy tej serii zaprojektowane są na najłżejsze z występujących w analizowanym rejonie przewody AFL-6×120 (5,05 N/m), dla których względny przyrost obciążenia sędzią był największy. Do uszkodzeń tych słupów przyczyniły się ponadto podwieszane światłowody, w których także względny przyrost obciążenia wywołanego sędzią był największy.

Efekty związane z kaskadowym uszkodzeniem wybranych odcinków linii pokazano na rysunkach 1 i 2.

3. Praca wybranego słupa przelotowego linii 110 kV

W celu przeprowadzenia analizy pracy słupa opracowano w programie Robot jego model obliczeniowy [9]. Do analiz przyjęto słup nr 76 linii 110 kV Morzyczyn – Łobez.

Tabela 3. Zestawienie wyężenia elementów konstrukcji słupa pod obciążeniem normowym

Lp.	Normowe obciążenia obliczeniowe	Maksymalne wyężenie elementu	Wychylenie wierzchołka UY [cm]
1	Ciężar wł. + sędzi normalna [6]	0,457	-1,1
2	Ciężar wł. + sędzi katastrofalna [6]	0,567	-1,4
3	Ciężar wł. + sędzi [8]	0,664	-2,1

Słup ten uległ zniszczeniu kaskadowemu. Model składa się z 578 prętów połączonych ze sobą w 248 węzłach. Całkowita masa konstrukcji prętowej wynosi 3682,5 kg. Przyjęto odwzorowanie w postaci konstrukcji ramownicowej wykonanej z kątowników równoramiennych łączonych w węzłach skratowań przegubowo.

Zgodnie z danymi technicznymi [10] katalogowe siły zrywające przewodów słupa 76 wynoszą:

- Przewody AFL 6–240, $F_{obl} = 82,8$ kN
- Przewody AFL 1,7–50 $F_{obl} = 40,1$ kN

przelotowych na liniach 110 kV i 220 kV potwierdza, że zjawisko miało charakter systemowy i wynikało z wystąpienia ekstremalnych obciążeń o jednorodnym charakterze, których projektowane wg określonych reguł słupy nie były w stanie przenieść.

Rozważano zastosowanie jednego z dwóch modeli zniszczenia słupa przelotowego:

- Proces iteracyjny dla przypadku jednorazowego, jednostronnego zerwania przewodów;
- Proces iteracyjny dla przypadku jednostronnie postępującego odciążania przewodów.

Tabela 4. Analiza przemieszczeń wierzchołka niszczonego słupa

Iteracja	1	2	3	4	5	6	7	8
Etap analizy	I	II	III	IV/1	IV/2	IV/3	IV/4	IV/5
UY [cm]	-0,8	-14,2	-39,7	-65,1	-73,5	-74,5	-75,4	-1866,3

Nie dysponując odpowiednio wiarygodnymi danymi przemawiającymi za jedną z wersji zniszczenia słupa uznano, że bardziej prawdopodobny był proces rozłożony w czasie na tyle długim, aby zjawisko nie miało gwałtownego charakteru. Za tą wersją przemawiają pozostałe na słupach przewody.

Przyjęto, że przyczyną złamania słupa był wzrost nierównomierności obciążenia spowodowany postępującym jednostronnym opadnięciem sadzi z przęsła od strony zawalonego słupa krańcowego. Wymagało to założenia, iż proces ten przebiegał w kolejnych etapach.

Obliczenia przeprowadzono na obciążeniach nominalnych, przyjmując zgodnie z [5] jako maksymalne graniczne naprężenia w elementach $f_y = 235$ MPa.

Przebieg iteracyjnego procesu niszczenia słupa przedstawiono w tabeli 4 poprzez podanie wychylenia poziomego wierzchołka w funkcji kolejnych etapów obciążenia, a nie bezpośrednio wartości obciążenia (zmniejszającego się jednostronnie w przyjętym modelu zniszczenia).

Osiągnięcie przez wierzchołek przemieszczenia $-1866,3$ cm uznano za wielkość sygnalizującą zniszczenie słupa. Porównanie efektu obliczeniowego z rzeczywistym obrazem zniszczenia słupa przedstawiono na rysunku 3.

5. Uwagi końcowe

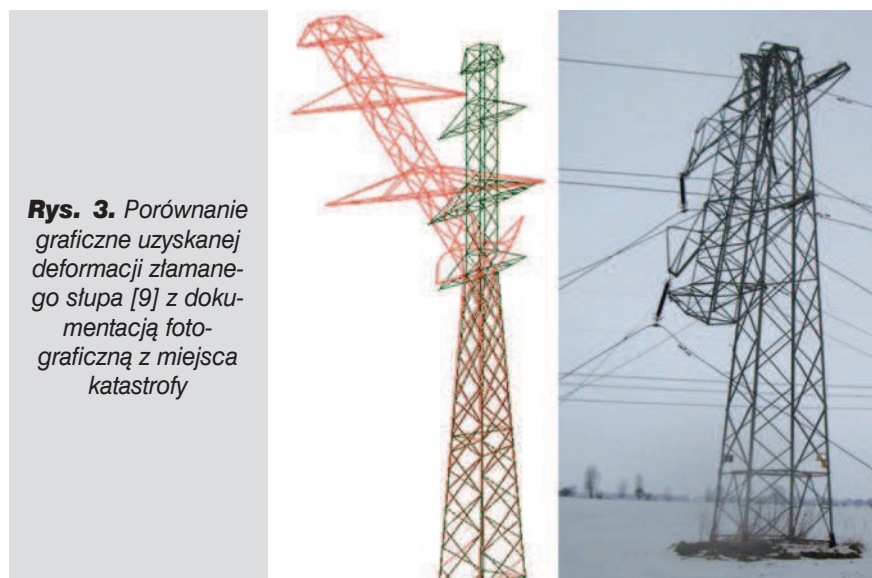
Do powstania blackout'u prowadzi cały szereg zdarzeń zachodzących w różnych obszarach decydujących o skutecznym funkcjonowaniu systemu elektroenergetycznego. Niniejszy artykuł dotyczy wybranego aspektu związanego z bezpieczeństwem słupów nośnych linii wysokich napięć. Przeprowadzone analizy pozwoliły na teoretyczne potwierdzenie występowania efektów zaobserwowanych w uszkodzonych słupach na odcinkach objętych zniszczeniem kaskadowym. Symulacje procesu zniszczenia słupa przelotowego dały wyniki odpowiadające efektom, które wystąpiły w konstrukcji rzeczywistej. Potwierdzona została lokalizacja przekroju najsłabszego z punktu widzenia przenoszenia

niezrównoważonych obciążeń występujących na kierunku linii.

Biorąc pod uwagę fakt, że bezpośrednią przyczyną mechanicznych zniszczeń słupów nośnych były na obszarze objętym blackout'em obciążenia pochodzenia atmosferycznego, wydaje się zasadnym, iż dla obszarów występowania ekstremalnych zjawisk atmosferycznych należy zweryfikować wielkości przyjmowanych obciążeń od sadzi i wiatru działających na przewody, a w konsekwencji na konstrukcje wsporcze napowietrznych linii elektroenergetycznych, w tym także dla podwieszonych na nich linii światłowodowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Paczkowska T., Paczkowski W., Aspekty budowlane katastrofy energetycznej w rejonie szczecińskim. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awaryjne Budowlane, Szczecin – Międzyzdroje 2009
- [2] Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S., Stalowe konstrukcje specjalne (rozdz. 3 Konstrukcje wsporcze napowietrznych linii elektroenergetycznych). Arkady, Warszawa 1995
- [3] Kończykowski S., Mayzel B., Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych. Arkady, Warszawa 1962
- [4] Poradnik Inżyniera Elektryka, t. 3. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996
- [5] PN-90/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [6] PN-75/E-05100. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa
- [7] PN-B-03205:1996. Konstrukcje stalowe. Podpory linii elektroenergetycznych. Projektowanie i wykonanie
- [8] PN-87/B-02013. Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. Obciążenie oblodzeniem
- [9] Mickiewicz W., Numeryczny model mechanizmu zniszczenia przelotowego słupa linii elektroenergetycznej 110 kV. Praca dyplomowa pod kierunkiem dr inż. T. Paczkowskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin 2009.
- [10] Przewody gołe – Katalog SWW 1121, Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego
- [11] Raport Zespołu ds. Zbadania Przyczyn i Skutków Katastrofy Energetycznej powołanego Zarządzeniem nr 154/2008 Wojewody Zachodniopomorskiego. Szczecin, czerwiec 2008



Rys. 3. Porównanie graficzne uzyskanej deformacji złamanego słupa [9] z dokumentacją fotograficzną z miejsca katastrofy