

Wrocław, 2015-06-08

Prof. dr hab. inż. Marian Sobierajski
Katedra Energoelektryki
Politechniki Wrocławskiej

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

Promotor pracy: dr hab. inż. Henryk Kocot

CEL ROZPRAWY

Obecnie eksploatowanych jest wiele linii w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, które zostały wybudowane przed kilkudziesięciu laty i zostały zaprojektowane dla temperatury granicznej 40 C.

W przypadku linii 220 kV szczególnie trudna sytuacja występuje wtedy, kiedy ograniczenia termiczne nie pozwalają na wyprowadzanie pełnej mocy z elektrowni. W przypadku linii 110 kV ograniczenia termiczne nie pozwalają efektywnie wykorzystać ciągów 110 kV zamykających stacje NN/110 kV. Obserwuje się również ograniczenia we wyprowadzaniu mocy z farm wiatrowych do sieci 110 kV.

Aktualna obciążalność prądowa linii napowietrznych zależy od warunków pogodowych. Jeżeli znane są parametry charakterystyczne dla linii takie jak temperatura powierzchni przewodu i warunki pogodowe otoczenia, to można oszacować dopuszczalny prąd.

O obciążalności linii decydują przesła, w których odległość przewodów od ziemi jest krytyczna. Dlatego bardzo ważny jest wybór odcinków linii, które powinny podlegać monitorowaniu.

Podstawowym celem monitorowania obciążalności linii jest dostarczenie dyspozytorowi, kierującemu ruchem sieci elektroenergetycznej, informacji o aktualnym stanie wykorzystania zdolności przesyłowych linii oraz informowanie o zagrożeniu bezpiecznej pracy linii, czyli

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

zbliżaniu się zwisów do granicznej odległości do ziemi lub możliwości przekroczenia dopuszczalnej temperatury przewodu.

W przypadku linii 110 kV, które często pracują w obwodach oczkowych równoległe do linii 220 i 400 kV monitorowanie aktualnego zapasu obciążenia prądowego jest szczególnie ważne. Sytuacja jest bardzo niebezpieczna w przypadku krótkich odcinków linii 110 kV równoległe połączonych z liniami 220 i 400 kV.

Generalnie można stwierdzić, że monitoring linii napowietrznych (pośredni lub bezpośredni) pozwala na pełne wykorzystanie rzeczywistej zdolności przesyłowej linii, przy jednoczesnym wyeliminowaniu ryzyka przekroczenia granicznej temperatury przewodu. Jest również ważnym elementem rozwoju inteligentnych sieci elektroenergetycznych.

Opiniowana rozprawa doktorska mieści się w nurcie światowych badań naukowych i ma bardzo duże znaczenie dla bezpieczeństwa pracy KSE.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

TEZA ROZPRAWY

W oparciu o przeprowadzoną analizę literatury przedmiotu doktorant stawia następującą tezę.

Możliwe jest zastosowanie nowych, niskonakładowych metod zwiększenia zdolności przesyłowych istniejących krajowych linii napowietrznych 110 i 220 kV.

Dowód tezy przeprowadził doktorant w kilku rozdziałach rozprawy.

W rozdziale 2 przedstawił wyniki analizy statystycznej temperatury, intensywności promieniowania słonecznego, prędkości i kąta natarcia wiatru oraz dokonał oceny ich wpływu na obciążalność prądową przewodów.

W rozdziale 3 zaproponował własny probabilistyczny model obciążalności prądowej linii napowietrznych, bazujący na pomiarze aktualnej temperatury otoczenia i prędkości wiatru. Model ten poddał weryfikacji dla warunków pogodowych lata i zimy z uwzględnieniem pory dziennej i nocnej.

W rozdziale 4 omówił modele mechaniczne stosowane do obliczania zwisów przewodów.

W rozdziale 5 scharakteryzował działania modernizacyjne mające na celu pełne wykorzystanie zdolności przesyłowych linii elektroenergetycznych.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie badań i wnioski końcowe.

Praca zawiera bogaty przegląd literatury (99 pozycje), wskazujący na dogłębne rozpoznanie prac innych autorów zajmujących się podobną problematyką na świecie i w kraju. Na podkreślenie zasługuje aktywność publikacyjna doktoranta w tematyce rozprawy doktorskiej. Jest on autorem i współautorem 5 publikacji oraz 4 opracowań dla przemysłu.

W świetle powyższych uwag, stwierdzam, że:

- wybrany przez doktoranta temat badawczy ma duże znaczenie teoretyczne i praktyczne,
- teza rozprawy doktorskiej została sformułowana poprawnie,

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

- trafnie został również wybrany sposób jej udowodnienia,
- rozprawa jest oryginalna w dyscyplinie naukowej elektrotechnika.

WYKAZANIE POPRAWNOŚCI TEZY

1. Doktorant wykazał w rozprawie, metodami pomiarowymi i obliczeniowymi, że opracowany przez niego probabilistyczny model może być wykorzystany do określania obciążalności termicznej linii napowietrznych.
2. W proponowanym modelu aktualna obciążalność prądowa linii została uzależniona od poziomu ryzyka.
3. Przeprowadzone analizy wykazały, że uwzględnienie ryzyka pozwala zwiększyć zdolność przesyłową linii, a pojawiające się zwiększenia zwisów przewodów mieszczą się w rezerwach przewidzianych w projektowaniu.
4. W rozprawie zamieszczono tabele obciążalności przewodów wynikające z proponowanego probabilistycznego modelu.

UWAGI

1. Zasadniczą wadą rozprawy doktorskiej jest brak definicji pojęć statystycznych, którymi posługuje się Autor. Szczególny brak definicji odczuwa się w przypadku często używanego w rozprawie pojęcia ryzyka. Pojęcie ryzyka jest definiowane w operacjach finansowych, w zarządzaniu, planowaniu, itp. Za każdym razem jest jednak odmiennie rozumiane.

2. Moim zdaniem, brak jest powiązania używanego w rozprawie doktorskiej pojęcia ryzyka z pojęciem kwantyla stosowanego w rachunku prawdopodobieństwa.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

W rachunku prawdopodobieństwa i analizie statystycznej kwantylem rzędu p rozkładu ciągłej zmiennej losowej X nazwana jest liczba ξ_p spełniająca nierówności

$$P(X \leq \xi_p) \geq p$$

$$P(X \geq \xi_p) \geq 1 - p$$

Kwantyl rzędu p jest zatem rozwiązaniem równania $F(\xi_p) = p$, gdzie F oznacza dystrybuantę rozkładu prawdopodobieństwa.

W przypadku rozkładu normalnego $N(0,1)$ z tablic tego rozkładu mamy następujące kwantyle dla p od 0.95 do 0.99, które moim zdaniem powiązane są z ryzykiem używanym w rozprawie.

α - ryzyko wg rozprawy doktorskiej	p	ξ_p - kwantyl rzędu p
5%	0,95	1,645
4%	0,96	1,751
3%	0,97	1,881
2%	0,98	2,054
1%	0,99	2,327

Wydaje się, że Autor przez ryzyko α rozumie prawdopodobieństwo $p=1-\alpha/100\%$ przekroczenia przez zmienną losową X dopuszczalnej wartości ξ_p

$$P(X \geq \xi_p) \geq 1 - p$$

W odniesieniu do dopuszczalnego prądu obciążenia linii I_d możemy kolejno zapisać

$$P(I_d \geq I_{dp}) \geq 1 - p$$

$$P(I_d \geq I_{dp}) = 1 - F(I_{dp}) = 1 - \Phi(\xi_p) = 1 - \Phi\left(\frac{I_{dp} - EI_d}{\sigma_{I_d}}\right)$$

gdzie

Φ - funkcja o wartościach podawanych w tablicach rozkładu $N(0,1)$.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

$$\xi_p = \frac{I_{dp} - EI_d}{\sigma_{Id}} - \text{zmienna losowa standaryzowana.}$$

Stąd

$I_{dp} = EI_d + \xi_p \sigma_{Id}$ - dopuszczalne obciążenie z procentowym ryzykiem przekroczenia na poziomie α .

Jeżeli powyższe rozumowanie jest poprawne, to moim zdaniem błędne jest nazywanie we wzorze (3.4) doktoranta wartości $I_{i,j}^\alpha$ kwantylem obciążalności prądowej z uwzględnieniem przyjętego poziomu ryzyka. Ze wzoru (3.3)

$$\int_{-\infty}^{I_{i,j}^\alpha} g_{i,j}(I) dI = \alpha$$

wynika bowiem, że dla ryzyka $\alpha = 5\%/100\% = 0.05$ kwantyl $I_{i,j}^\alpha$ wynosi $E(I) - 1.64 \sigma_I$ i jest mniejszy od wartości oczekiwanej.

3. Poważnym mankamentem rozprawy jest pominięcie na stronie 4 w "Wykazie ważniejszych oznaczeń" bardzo wielu wielkości występujących w tekście rozprawy oraz stosowanie takich samych symboli do oznaczania różnych wielkości. Przykładowo, moc cieplna oddawana z przewodu przez konwekcję jest oznaczona w "Wykazie .." symbolem P_c , ale na stronie 120 obok symbolu P_c występuje symbol P_k objaśniany jako moc cieplna oddawana na drodze konwekcji. Symbol σ jest używany z różnymi indeksami na oznaczenie odchylenia standardowego zmiennej losowej oraz jako naprężenie w oplocie przewodu. Ponadto dwa symbole w "Wykazie .." σ_A oraz σ_R zostały opisane identycznie jako "naprężenie w oplocie przewodu".

4. Czytelnika zaskakuje na stronie 15 stwierdzenie, że "Duże wartości statystyki χ^2 stanowiące podstawę do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu temperatury otoczenia

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

są wynikiem zbyt dużej liczebności próby [3,26]". Jak ta uwaga ma się do centralnego twierdzenia granicznego rachunku prawdopodobieństwa, z którego wynika, że im większa liczebność próby tym bardziej suma zmiennych losowych niezależnych zbliża się do normalnego rozkładu prawdopodobieństwa?

5. Nie rozumiem wyników podanych w Tabeli 2.5 na stronie 17. Jeżeli podane tam prawdopodobieństwa odnoszą się do wartości oczekiwanej 22.7°C i odchylenia standardowego 4.7 K, a zmienna losowa ma rozkład normalny, to wyniki są niepoprawne. Podaję prawidłowe wyniki wyliczone wg formuły znanej z teorii rachunku prawdopodobieństwa

$$P(X \geq a) = 1 - F(a) = 1 - \Phi(z_a) = 1 - \Phi\left(\frac{a - m}{\sigma}\right)$$

gdzie m - wartość oczekiwana, σ - odchylenie standardowe, a - graniczna wartość przekraczana przez zmienną losową o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa, Φ - funkcja o wartościach podawanych w tablicach rozkładu $N(0,1)$.

Temperatura otoczenia	20°C	25°C	30°C	35°C
Prawdopodobieństwo przekroczenia (Autor)	0.42	0.18	0.02	0.00
Prawdopodobieństwo przekroczenia (Recenzent)	0.72	0.31	0.06	0.0044

6. Na str. 19 Autor stwierdza, że "... na podstawie sporządzonych rozkładów widać, że korelacja ta nie jest zbyt silna - występują również sytuacje, w których pomimo wysokiej temperatury otoczenia, zanotowano wiatr o niewielkiej prędkości". Czy stwierdzenie to jest poparte testami statystycznymi niezależności zmiennych losowych? Jeżeli tak, to w rozprawie brak jest wyników testu niezależności obu zmiennych losowych. Brak jest również wyników testu dotyczącego współczynnika korelacji temperatury otoczenia i prędkości wiatru. Na jakiej podstawie Autor na stronie 48 twierdzi, że "...Jak wykazują analizy przeprowadzone w rozdziale 2 oraz w [67] temperatura otoczenia jest wielkością stabilną w czasie i przestrzeni, koreluje także z prędkością wiatru." Czy Autor mówiąc "koreluje" ma na myśli fakt, że obie zmienne są skorelowane, tzn. na podstawie znajomości kowariancji oraz wariancji można wyznaczyć dla obu

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

zmiennych losowych współczynnik korelacji, czy też używa słowa "koreluje" w znaczeniu potocznym, że obie zmienne jakoś tam zależą od siebie.

7. Na str. 27 Autor podaje, że przeprowadzono weryfikację hipotezy o wykładniczym charakterze rozkładu prawdopodobieństwa intensywności promieniowania słonecznego. Na jakim poziomie istotności? Jaka była wartość statystyki? Jaki był obszar odrzucenia hipotezy? W rozprawie brak jest danych na ten temat. W tym fragmencie rozprawy Autor ponownie mylnie twierdzi, że odrzucenie hipotezy "...Jest spowodowane dużą liczebnością analizowanych danych pomiarowych...".

8. Na stronie 50 Autor pisze "... Obliczenia wykonano na rzeczywistych rozkładach zmiennych losowych dla temperatury granicznej roboczej linii równej 40°C.". Czy mówiąc "rzeczywiste" Autor ma na myśli empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa, czy też teoretyczne.

9. Niejasny jest dla mnie związek logiczny między zależnościami podanymi we wzorze (3.5) i (3.6).

Wzór (3.5) podaje równanie regresji wielokrotnej dla niezależnych zmiennych losowych $X=x_1, \dots, x_k$. Wzór (3.6) nie może jednak być równaniem regresji wielokrotnej, gdyż poszczególne zmienne losowe są skorelowane.

Między zmiennymi X i zmiennymi T_a, v istnieje związek funkcyjny, który można zapisać macierzowo

$$X = AZ = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_a & 0 \\ 0 & v \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ v \end{bmatrix}$$

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

czyli

$$x_1 = Ta^2$$

$$x_2 = v^2$$

$$x_3 = Ta$$

$$x_4 = v$$

$$x_5 = v$$

$$z_1 = Ta$$

$$z_2 = v$$

Zmienne losowe Ta , v są niezależne, czyli mają diagonalną macierz korelacji

$$M_z = \begin{bmatrix} w_{Ta} & 0 \\ 0 & w_v \end{bmatrix}$$

gdzie w oznacza wariancję.

Gdyby przekształcenia dokonać w otoczeniu ustalonego punktu Ta_0 , v_0 , to zmienne losowe będą opisane macierzą kowariancji

$$M_x = A M_z A^T$$

Załóżmy, że $Z = (Ta_0=30, v_0=8)$, czyli

$$A = \begin{bmatrix} Ta & 0 \\ 0 & v \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ v & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 8 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 8 & 0 \end{bmatrix}$$

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

Niech diagonalna macierz kowariancji zmiennych T_a, v ma wartość

$$M_z = \begin{bmatrix} wT_a & 0 \\ 0 & wv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} =$$

Wtedy wynikowa macierz kowariancji nie jest macierzą diagonalną i dla powyższych danych wyniesie

$$M_x = \begin{bmatrix} 3600 & 0 & 120 & 0 & 960 \\ 0 & 128 & 0 & 16 & 0 \\ 120 & 0 & 4 & 0 & 32 \\ 0 & 16 & 0 & 2 & 0 \\ 960 & 0 & 32 & 0 & 256 \end{bmatrix}$$

Niezerowe kowariancje w macierzy kowariancji M_x oznaczają skorelowanie zmiennych x_1, \dots, x_5 między sobą.

Poruszone tu kwestie znikają, jeżeli zależność (3.6) jest nieliniową aproksymacją nieznaną zależność funkcyjną obciążalności prądowej od zmiennych losowych T_a i v . Można tego dokonać na różne sposoby. Przykładowo w Matlabie do aproksymacji - z uwzględnieniem wartości oczekiwanych i odchyłeń standardowych obserwowanych zmiennych losowych - wykorzystuje się funkcję `polyfit()`. Ogólna postać wielomianu aproksymującego obciążalność prądową miałaby wtedy postać

$$y = k_1 x^n + k_2 x^{n-1} + \dots + k_n x^1 + k_{n+1}$$

Autor pisze, że korzystał z oprogramowania Statistica. Jakie metody aproksymacyjne zostały tu wykorzystane? Czy przy aproksymacji korzystano z normalności rozkładu zmiennych losowych T_a, v ? Czy było wymagane założenie niezależności zmiennych losowych? Jakie stopnie nieliniowości wielomianu były rozważane?

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kubka pt. "Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia."

Mimo wskazanych uchybień proponowany probabilistyczny jest poprawny i dobrze udokumentowany. Materiał ilustracyjny jest dobrze dobrany i przekonujący.

WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy bardzo ważnego i trudnego teoretycznego zagadnienia wyznaczania dopuszczalnych prądów obciążenia linii napowietrznych z uwzględnieniem losowego charakteru temperatury otoczenia oraz prędkości wiatru.

Uważam, że doktorant rozwiązując postawione sobie zadanie wykazał się dużą wiedzą teoretyczną i praktyczną z elektrotechniki oraz rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach i tytułach naukowych i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Pawła Kubka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Prof. dr hab. inż. Marian Sobierajski

