

- [5] Ekstrom A.: A Refined HVDC Control System. *IEEE Transactions on Power Apparatus*, Vol. PAS-89, No. 5/6, May/June 1970
- [6] Arrillaga J., Galanos G., Powner E. T.: Direct Digital Control of HVDC Converters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 8, November/December 1970
- [7] Hügelschäfer J., Vaupel G.: Digital Firing Control for Line-Commutated High Power Converters. 6th International Conference on AC DC Power Transmission IEE, London 29 April – 3 May 1996

- [8] Alegria C. M., Sucena Paiva J. P., Freris L. L.: Microcomputer Control of Power Converters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 8, August 1984
- [9] Pimenta T. C., Vermaas L. L. G., Crepaldi P. C., Moreno R. L.: The Design of A Digital IC for Thyristor Triggering, Tenth International Conference on VLSI Design: VLSI in Multimedia Applications, January 4–7, 1997



Zbigniew Nartowski

Instalacje elektroenergetyczne wysokiego napięcia – odstęp minimalne

Ustanowienie nowej normy PN-E-05115 – Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV [1] zmieniło w pewnym stopniu reguły stosowane dotychczas w projektowaniu i budowie stacji, rozdzielni, elektrowni itp. nazwanych obecnie łącznie instalacjami elektroenergetycznymi wysokiego napięcia (WN). Dawne reguły opierały się na przestarzałych Przepisach Budowy Urządzeń Elektrycznych (PBUE) wprowadzonych ponad 40 lat temu.

W artykule niniejszym przedstawiono zmienione wymagania dotyczące ważnego fragmentu tych reguł, jakimi są minimalne odstęp w powietrzu. Są to najmniejsze odstęp zapewniające wytrzymałość elektryczną izolacji powietrznej. Stanowią one także podstawę dla nie objętych niniejszym artykułem odstępów bezpiecznych dla obsługi (jak odstęp przegrody itp.) oraz minimalnych odległości zbliżenia, stosowanych przy pracach eksploatacyjnych.

Wymagania w zakresie odstępów minimalnych (jak też i w wielu innych sprawach) podane są w normie wariantowo. Zachodzi zatem konieczność wyboru jednej ze znormalizowanych wartości.

Trzeba przy tym zauważyć, że norma [1], stanowiąca wprowadzenie europejskiego Dokumentu Harmonizującego HD [2], uwzględnia różne warunki występujące w krajach całej Europy. Wobec tego należy wybrać wartości odpowiadające warunkom występującym w Polsce. Tak wybrane wartości odstępów zestawiono w artykule, w postaci wygodnej dla projektanta wraz z krótkim komentarzem do tego wyboru.

Wymagania dotyczące izolacji elektrycznej

W instalacji otwartej wysokiego napięcia (nie osłoniętej) odstęp powietrzne stanowią bardzo istotny element jej izolacji elektrycznej. Dlatego należy oprzeć się na wymaganiach dotyczących izolacji całej instalacji oraz zain-

stalowanych w niej urządzeń. W tym zakresie norma [1] odwołuje się do dwuczęściowej normy na koordynację izolacji PN-EN 60071-1 [3], oraz PN-EN 60071-2 [4] opartej na normie IEC.

W normie [3] dla znormalizowanych wartości najwyższego napięcia urządzenia (U_m) podano wymagane znormalizowane wartości:

- napięcia wytrzymawanego krótkotrwałego o częstotliwości sieciowej (U_{w50Hz}),
- napięcia wytrzymawanego udarowego piorunowego (U_{wl}),
- napięcia wytrzymawanego udarowego łączeniowego (U_{ws}).

Zestaw znormalizowanych napięć stanowi określenie poziomu izolacji.

W normie [3] podzielono napięcia U_m na dwa zakresy: zakres I zawierający napięcia o wartości, nie większej niż 245 kV, oraz zakres II, obejmujący wyższe napięcia. W normie tabelarycznie zestawiono dla zakresu I następujące wymagane wartości: $U_{m'}$, U_{w50Hz} i U_{wl} a dla zakresu II wartości $U_{m'}$, U_{wl} oraz U_{ws} . To ostatnie napięcie określone jest zarówno dla izolacji doziemnej jak też i dla izolacji międzyfazowej.

W normie PN-E-05115 (zgodnie z dokumentem HD) przytoczone zostały te wartości, według normy [3], przy czym zakres I podzielono na dwa zakresy A i B, a zakres II nazwano zakresem C. Ponadto wprowadzono w normie [1] pojęcie i wartości napięcia nominalnego sieci U_n (np. 6, 15, 110 kV).

Celowe jest zwrócenie uwagi na zastosowany, zgodnie z dokumentem europejskim, termin „napięcie nominalne”. W normalizacji międzynarodowej stosowane są dwa bliskie, ale jednak różne pojęcia i dwa odpowiadające im terminy: „wartość znamionowa” i „wartość nominalna”.

Pierwszy z nich jest używany do celów specyfikacji i określa ściśle wymagane i często sprawdzane laboratoryjnie parametry (na przykład napięcie znamionowe ogranicznika przepięć), a drugi jest używany do nazwania i identyfikacji. Stąd wprowadzenie terminu „napięcie nominalne sieci” (lub instalacji), jako nazwa tej sieci. To terminologiczne zagadnienie omówiono szerzej w [5].

Poziomy izolacji, wybrane z wartości ujętych w normie PN-E-05115, zostały ustalone dla sieci polskich w Zasadach [6], zatwierdzonych przez PSE SA. Obejmują one pełny zakres stosowanych u nas napięć nominalnych sieci. Ustalenia te są zgodne z innymi opracowaniami specjalistów polskich, a zatem nie są one przedmiotem dyskusji. Wartości te są podane w pierwszych kolumnach zamieszczonych poniżej tabel 1 i 2. Pominęto tu napięcie U_{w50Hz} , gdyż napięcie to nie wymiaruje wymaganej przerwy powietrznej.

Wymiarowanie minimalnych odstępów w powietrzu

Zgodnie z normą PN-E-05115 konieczne jest sprawdzenie czy wymagania dotyczące wytrzymałości elektrycznej są spełnione. Urządzenia takie, jak transformatory, aparaty rozdzielcze, fabrycznie produkowane rozdzielnice itp. poddawane są laboratoryjnym badaniom wytrzymałości elektrycznej.

Wyniki prób podawane są w certyfikacie wyrobu. Natomiast badania takie dla całych instalacji są zwykle technicznie niemożliwe do wykonania. Ustalono więc w normie [1], że nie są one konieczne w odniesieniu do instalacji, jeżeli są zachowane podane w normie minimalne odstępów w powietrzu. Odstępy te oczywiście nie obowiązują tam, gdzie stwierdzono na drodze prób, że wytrzymałość izolacji jest wystarczająca. Odnosi się to przykładowo do strefy przyłączenia aparatu, badanego wraz z najbliższym fragmentem przyłączonych przewodów.

W instalacjach otwartych (to jest nie osłoniętych) występują podstawowo dwa przypadki:

- izolacja doziemna i związany z nią odstęp minimalny w powietrzu doziemny (odstęp pomiędzy częścią czynną i częścią przewodzącą uziemioną: F-Z) oraz
- izolacja międzyfazowa i odpowiadający jej odstęp minimalny w powietrzu międzyfazowy (odstęp pomiędzy częściami czynnymi różnych faz: F-F).

Wytrzymałość elektryczna przerwy powietrznej zależy od długości przerwy (odstępu) przy określonym rodzaju przepięcia oraz dla określonej konfiguracji elektrod.

Wymagane minimalne odstępów w powietrzu, dla pełnego zakresu znormalizowanych wytrzymaemywanych napięć udarowych piorunowych oraz łączeniowych podane są w normie [4], w postaci tabel. Warto zwrócić uwagę na to, że wytrzymałość przerwy powietrznej na udary łączeniowe jest wyraźnie niższa od wytrzymałości na udary piorunowe. Przykładowo, przy wytrzymaemywanym napięciu 950 kV dla udaru piorunowego wymagany jest odstęp 1700 mm, a dla łączeniowego odstęp 2200 mm. Znormalizowane odstępów odnoszą się do określonych konfiguracji elektrod.

Na podstawie normy [3] i [4] oraz wprowadzając pewne odstępstwa wynikające z dotychczasowej praktyki w niektórych krajach europejskich podano w normie PN-E-05115 [1] wymagane minimalne odstępów dla instalacji. Obejmują one pełny zakres znormalizowanych napięć nominalnych sieci U_n i przynależnych wartości najwyższego napięcia urządzenia U_m oraz związanych z nimi znormalizowanych wytrzymaemywanych napięć udarowych.

Z tabel zamieszczonych w normie [1], uwzględniając wymagania dotyczące koordynacji izolacji, określone w Zasadach [6], zostały wybrane i podane w niniejszym artykule wartości napięć i odstępów dla warunków polskich. Przedstawiono je poniżej w tabelach 1 i 2.

Pierwsza tabela obejmuje sieci o napięciu nominalnym od 6 do 220 kV, a druga dotyczy sieci o napięciu nominalnym 380 kV (nazwa wg normy), w praktyce polskiej nazywanej siecią 400 kV.

Minimalne odstępów w powietrzu dla zakresu 6–220 kV

Dla stosowanych napięć nominalnych sieci U_n w tabeli 1 podano odpowiadające im najwyższe napięcie urządzenia U_m i wybrane znormalizowane napięcie wytrzymaemywane udarowe piorunowe U_{wl} , które jest wymiarujące dla odstępów w tym zakresie napięć. W dalszych kolumnach tabeli 1 podano najmniejsze odstępów w powietrzu odnoszące się do instalacji wewnętrznych (Wn.) i napowietrznych (Nap.).

Od 20 kV wzwyż odstępów nie zależą od sposobu wykonania instalacji. Minimalne odstępów w powietrzu podane w tabeli 1 odnoszą się zarówno do odstępów doziemnych jak też i międzyfazowych. Odstępy podane w normie ustalono przy założeniu niekorzystnego układu elektrod, to jest o małym promieniu krzywizny (układ pręt-konstrukcja). Odstępy te oznaczone są literą **N** i stanowią one podstawę dla ustalania odstępów i odległości bezpiecznych dla obsługi.

W ostatniej części tabeli 1 zestawiono dla porównania stosowane w przeszłości odstępów podane w PBUE. Porównując odstępów ustalone w nowej normie z odstępami stosowanymi poprzednio można stwierdzić niewielkie zwiększenie odstępów dla napięć 6 i 10 kV, natomiast wyeliminowano znacząco mniejsze odstępów dla instalacji wewnętrznych dla napięć 20 kV i wyższych wprowadzając jeden odstęp dla obu wykonania.

Szczególną uwagę należy zwrócić na napięcie 110 kV. Zgodnie z dokumentem europejskim w normie [1] zalecono, aby wytrzymaemywane napięcie udarowe piorunowe

Tabela 1

Minimalne odstępów w powietrzu (mm), zakres 6–220 kV

U_n , kV	U_m , kV	U_{wl} , kV	N		wg PBUE	
			Wn.	Nap.	Wn.	Nap.
6	7,2	60	90	120–	90	–
10	12	75	120	150	115	130
15	17,5	95	160	160	160	160
20	24	125	220		190	220
30	36	170	320		230	320
110	123	450	900		800	920
220	245	850	1700		–	1850

$U_{wl}=450$ kV i związany z tym odstęp 900 mm stosować tylko w specjalnych przypadkach. Wynikałaby stąd konieczność stosowania w normalnym projektowaniu poziom izolacji $U_{wl}=550$ kV i odstęp 1100 mm. Zalecenie to jest niezgodne z normą [3], w której poziom izolacji $U_{wl}=450$ kV występuje bez żadnych ograniczeń. Tak samo poziom 450 kV jest pełnoprawny w normie IEC 61936-1 [7], która będzie stanowić podstawę dla przyszłej normy EN, zastępującej obecny dokument HD. Można przypuszczać, że ustalenie europejskiego dokumentu HD związane jest z sposobem uziemienia punktu neutralnego niemieckiej sieci 110 kV (sieć skompensowana), który uzasadnia stosowanie wyższego poziomu izolacji.

Wieloletnie pozytywne doświadczenie eksploatacyjne mocno rozwiniętych polskich sieci 110 kV, pracujących z punktem neutralnym uziemionym przez małą impedancję i ponad 2000 polskich rozdzielni 110 kV zaprojektowanych na odstęp 920 mm, oraz zdecydowana opinia Instytutu Energetyki stanowiły podstawę dla PKN do zamieszczenia w normie PN-E-05115 odsyłacza krajowego (łatwego do przeoczenia ze względu na drobny druk) zezwalającego na stosowanie zgodnego z normami [3], [4] i [7] poziomu 450 kV i znormalizowanego odstępu 900 mm. Przyjęcie poziomu 450 kV jest również zgodne z Zasadami [6]. To odstępstwo od ścisłego stosowania normy europejskiej jest oparte na punkcie 4.3.1 normy [1], który dopuszcza w określonych warunkach stosowanie mniejszych odstępów aniżeli podane w normie [1].

Dla instalacji 220 kV przyjęty w Zasadach [6] poziom piorunowy 850 kV daje podstawę do wymaganego minimalnego odstępu 1700 mm, mniejszego aniżeli stosowany dotąd wg PBUE.

Minimalne odstęp w powietrzu dla instalacji 380 (400) kV

W tabeli 2 podane są odstępki odnoszące się do instalacji o napięciu wyższym od 220 kV.

W Polsce w tym zakresie mamy obecnie tylko napięcie nominalne 380 kV. Jest to nazwa zastosowana w normie [1] i używana w Niemczech i Włoszech, natomiast w Polsce, Francji i Szwecji używana jest nazwa 400 kV. Wszędzie w tych krajach, niezależnie od stosowanej nazwy, zainstalowane są urządzenia o napięciu $U_m=420$ kV, a wielka, wspólna sieć przesyłowa z tymi urządzeniami obejmuje całą Europę.

W zakresie napięć przy $U_m > 245$ kV o odstępach powietrznych na ogół decyduje napięcie wytrzymałowe udarowe łączeniowe U_{ws} . To napięcie ma różne wartości dla izolacji doziemnej (F-Z) i międzyfazowej (F-F). W niewielu przypadkach odstęp powietrzny wymiarowany jest przez wytrzymałowe napięcie udarowe piorunowe U_{wl} . Taki przypadek występuje właśnie dla $U_n=380$ (400) kV, gdzie dla odstępu F-Z przy korzystnym układzie elektrod podano w normie [1] minimalny odstęp 2200 mm, wynikający z wytrzymałowego doziemnego napięcia udarowego łączeniowego. Jednakże uwzględnienie udaru piorunowego wymaga

zwiększenia tego odstępu do 2400 mm, co zostało uwzględnione w tabeli 2 i w normie [7]. Dla niekorzystnego układu elektrod wymiarujący jest odstęp wymagany ze względu na udar łączeniowy. Warto zaznaczyć, że dla napięcia $U_n=380$ (400) kV wymagane międzyfazowe napięcie wytrzymałowe udarowe łączeniowe U_{ws} jest większe od odpowiedniego napięcia piorunowego U_{wl} , a tym samym udar łączeniowy jest wymiarujący.

Dla tego zakresu napięciowego duże znaczenie ma układ geometryczny elektrod. W celu zwiększenia przejrzystości tabeli 2 opis korzystnych i niekorzystnych konfiguracji elektrod przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 2

Minimalne odstępki w powietrzu (mm), zakres 380 (400) kV

$U_{n'}$ kV	$U_{m'}$ kV	Izolacja	$U_{wl'}$ kV	$U_{ws'}$ kV	Wg PN-E-05115		Instrukcja projektowa <i>Energoprojektu</i>
					korzystny	niekorzystny	
380 (400)	420	F-Z	1300	950	2400	2900 N	3050
		F-F		1425	3100	3600	3500

Tabela 3

Znormalizowane konfiguracje elektrod

Odstęp	Układ korzystny	Układ niekorzystny
Odstęp doziemny F-Z	przewód-konstrukcja	pręt-konstrukcja
Odstęp międzyfazowy	przewód-przewód równoległy	pręt-przewód

Opis ten, przytoczony wg normy [1] i [4] uwzględnia podstawowe przypadki występujące w projektowaniu. Układ pręt-konstrukcja lub pręt-przewód odnosi się do pręta usytuowanego prostopadle do płaszczyzny konstrukcji lub do przewodu. Niekorzystne konfiguracje elektrod wiążą się z asymetrią układu elektrod i wytwarzanego przez nie pola elektrycznego, a korzystne z symetrycznym układem elektrod i rozkładem pola. Szersze omówienie zagadnienia współczynników uwzględniających konfigurację elektrod zamieszczone jest w pożytecznym informacyjnym załączniku G do normy [4]. W przypadku trudności w zakwalifikowaniu układu elektrod w praktycznym projektowaniu zalecane jest w [7] ostrożne przyjęcie niekorzystnego układu.

PBUE nie obejmowały napięcia 400 kV i w projektowaniu stosowano odstępki wg Instrukcji Projektowej *Energoprojektu Kraków* z 1984 r.; te wartości podano w końcu tabeli 2.

Komentując tę tablicę należy stwierdzić ogólne zmniejszenie wymaganych odstępów za wyjątkiem odstępu F-F dla niekorzystnej konfiguracji elektrod. Występuje tam niewielkie zwiększenie minimalnego odstępu. Ustalenia normy [1] pozwolą na bardziej racjonalne projektowanie instalacji o tym napięciu.

Odstępem podstawowym dla bezpiecznych odległości dla obsługi, oznaczonym literą N, jest odstęp doziemny odnoszący się do niekorzystnego układu elektrod.

Minimalne odstęp w warunkach szczególnych

Przedstawione wyżej podstawowe minimalne odstęp w powietrzu odnoszą się do normalnych sytuacji i normalnych warunków pracy. Występują jednak czasem sytuacje, dla których stawiane są ostrzejsze wymagania, a także warunki zezwalające na ich redukcję. W przypadku kiedy pomiędzy częściami rozdzielni może wystąpić opozycja faz podane odstęp między tymi częściami należy tam zwiększyć do 120% odstępów podstawowych. Taka sytuacja może mieć miejsce w stacji przyłączonej do dwóch niesynchronicznie pracujących systemów. Natomiast, jeżeli dwie części rozdzielni przynależą do różnych poziomów izolacji, to odstęp między tymi częściami powinny być zwiększone co najmniej do 125% odstępów ustalonych dla wyższego poziomu izolacji.

Warunki zakłóceniami zezwalają natomiast na stosowanie zmniejszonych wymaganych odstępów. W przypadku wychyłu przewodów giętkich pod wpływem sił zwarciovych wymagane jest tylko 50% odstepu podstawowego. Tak znaczne zmniejszenie wymaganego odstepu jest uzasadnione znikomym prawdopodobieństwem równoczesnego wystąpienia maksymalnego wychyłu i przepięcia. Większe prawdopodobieństwo zagrożenia występuje natomiast w przypadku maksymalnego wychyłu powodowanego przez parcie wiatru i stąd wymagane jest, aby odstep był nie mniejszy niż 75% odstepu podstawowego. Taki sam odstep (75%) jest wymagany dla przypadku zerwania jednego rzędu w wielorzędownym łańcuchu izolatorowym.

Zakończenie

Przedstawiono wyżej wymagania aktualnej normy [1] w zakresie minimalnych odstępów w powietrzu, wybrane dla warunków polskich i przedstawione w formie dogodnej dla praktyki projektowej. Są one oparte na normie IEC dotyczącej koordynacji izolacji i tym samym zapewniają bezpieczeństwo pracy instalacji. W porównaniu ze stosowanymi dotąd wymaganiami PBUE są one kompletne, w pełni racjonalne, a także w wielu przypadkach korzystniejsze.

Odstępy oznaczone literą N stanowią podstawę do ustalenia odstępów i odległości zapewniających bezpieczeństwo dla obsługi instalacji.

LITERATURA

- [1] PN-E-05115:2002 Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV
- [2] HD 637 S1:1999 Power installations exceeding 1 kV a.c
- [3] PN-EN 60071-1:1995 Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły
- [4] PN-EN 60071-2:1997 Koordynacja izolacji — Przewodnik stosowania
- [5] Nartowski Z.: Instalacje elektroenergetyczne wysokiego napięcia (terminologia). *INPE 2002*, nr 43
- [6] Zasady Ochrony od Przepięć i Koordynacja Izolacji Sieci Elektroenergetycznych. *PSE SA*, Warszawa 2001
- [7] IEC 61936-1:2002 Power installations exceeding 1 kV a.c. Common rules

