

Udoskonalone zabezpieczenie transformatorów od zwarć zwojowych w sieciach energetycznych z generacją inwerterową

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska dotyczy dwóch złożonych obszarów badawczych: doskonalenia procedur detekcji zwarć zwojowych (ZZ) w transformatorach energetycznych oraz wpływu generacji inwerterowej (GI) na działanie takich zabezpieczeń. Wykrywanie ZZ w transformatorach energetycznych jest wyzwaniem, ponieważ prądy zwarciove obserwowane na zaciskach transformatora są bardzo małe. Potrzeba niezawodnego zabezpieczenia transformatorów od ZZ jest jednak bardzo duża ze względu na ogromne prądy zwarciove wewnątrz zwartych zwojów i wynikające z tego konsekwencje w postaci możliwych uszkodzeń. Z drugiej strony, w przypadku tak czułego zabezpieczenia, niekorzystne warunki, takie jak prądy rozruchowe transformatora lub błędy przekładników prądowych podczas zwarć zewnętrznych, mogą prowadzić do nieprawidłowego działania zabezpieczenia. Charakterystyka prądu zwarciovego dla zasilania ze źródła GI jest istotnie różna od zasilania przez generator synchroniczny, szczególnie w odniesieniu do prądu składowej przeciwnej często stosowanego jako kryterium w zabezpieczeniach od ZZ.

W ramach pracy doktorskiej przeprowadzono studia literaturowe dotyczące modelowania ZZ w transformatorach, układów zabezpieczeń od ZZ oraz modelowania GI. Opracowano model symulacyjny testowego systemu elektroenergetycznego z modułowym przekształtnikiem wielopoziomowym (MMC) dla łącza z siecią prądem stałym (HVDC) wraz z jego odpowiednim sterowaniem. W modelu zaimplementowano procedurę LVRT (Low-Voltage-Ride-Through) w celu spełnienia wymagań kodeksów sieciowych dotyczących udziału biernego prądu zwarciovego składowych zgodnej i przeciwnej.

Model HVDC-MMC został wykorzystany do symulacji stanów nieustalonych z różnym stopniem zasilania z GI oraz do oceny niezawodności zabezpieczenia różnicowego transformatora i czterech innych wybranych układów zabezpieczeń od ZZ. Zaobserwowano, że zabezpieczenia oparte na prądzie różnicowym składowej przeciwnej są w zasadzie odpowiednie dla wykrywania ZZ z zasilaniem z GI, natomiast zabezpieczenia kierunkowe oparte na prądzie składowej przeciwnej mogą działać niepoprawnie. Zaobserwowano również, że wielkość wektorowej sumy prądów składowej przeciwnej po obu stronach transformatora jest taka sama dla zasilania z maszyny synchronicznej jak i dla zasilania z GI, niezależnie od poziomu generacji oraz charakterystyki biernego LVRT i sposobu sterowania prądem.

Stwierdzono, że badane przyrostowe zabezpieczenie różnicowoprądowe składowej przeciwnej (87Q FRIC) zapewnia znacznie większą czułość niż zwykłe zabezpieczenie różnicowoprądowe składowej przeciwnej (87Q) i standardowe zabezpieczenie różnicowe transformatora (87T), przy porównywalnym stopniu selektywności. Dla zabezpieczenia 87Q FRIC zidentyfikowano jednak pewne obszary wymagające poprawy. Zabezpieczenie różnicowe kierunkowe składowej przeciwnej (SNSDP) i zabezpieczenie całkowite składowej przeciwnej zapewniały właściwą selektywność dla zakłóceń zewnętrznych. Jednak dla zasilania typu GI i SCR większym od 1, obie metody zabezpieczeń okazały się mieć niewystarczającą czułość dla ZZ.

Propozycją Autora pracy jest nowy schemat zabezpieczenia przyrostowego różnicowoprądowego składowej przeciwnej z dodatkową stabilizacją zerowoprądową (ZSINSD), który został opracowany jako udoskonalenie zabezpieczenia 87Q FRIC. Wprowadzono trzy nowe kryteria stabilizacji oparte na podobieństwie wektorowym przyrostowych prądów różnicowych składowej zgodnej i przeciwnej oraz stosunku i przesunięcia fazowego prądu różnicowego składowej zerowej do prądu różnicowego składowej przeciwnej. Zasadność nowych kryteriów stabilizacji została zweryfikowana poprzez analizę korelacji składowych symetrycznych, z wykorzystaniem równań uzyskanych dla schematów zastępczych Thévenina dla ZZ. Zaproponowane kryteria stabilizacji zabezpieczenia gwarantują wysoki poziom selektywności w niekorzystnych warunkach, takich jak prądy rozruchowe transformatora oraz zwarcia zewnętrzne z nasyceniem przekładników prądowych. Opracowany schemat zabezpieczenia został szeroko przetestowany na modelu symulacyjnym systemu elektroenergetycznego bez i z GI, wykazując wyższą czułość i selektywność w porównaniu z innymi badanymi rodzajami zabezpieczeń.