



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0053085

(43) 공개일자 2015년05월15일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H02J 3/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2013-0134845

(22) 출원일자 2013년11월07일

심사청구일자 2013년11월07일

(71) 출원인

고려대학교 산학협력단

서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)

(72) 발명자

황평익

서울 관악구 관악로 1, 공과대학 301동 616호 (신림동, 서울대학교)

문승일

서울 관악구 관악로 1, 공과대학 301동 616호 (신림동, 서울대학교)

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

특허법인충현

전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템

(57) 요약

본 발명은 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템에 관한 것으로, 보다 구체적으로는 분산전원모델링부가 출력필터에 기초하여 분산전원(Distributed Generation)의 종류를 판단하는 단계; 상전류계산부가 상기 분산전원의 정상상태에서 출력되는 상 전류를 계산하는 단계; 및 조류계산부가 상기 상 전류에 기초하여

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1



상기 분산전원의 전력 조류를 계산하는 단계; 를 포함한다.

이러한 구성에 의해, 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템은 배전계통의 분산전원이 연계된 지점에서 전압 및 전류 전력의 분포를 정확하게 판단할 수 있어, 분산전원이 연계된 배전계통을 안정화시킬 수 있는 효과가 있다.

또한 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템은 배전계통의 불균형 동작조건에서도 분산전원의 상이 달라지는 것을 방지할 수 있는 효과가 있다.

(72) 발명자

안선주

광주광역시 북구 용봉로 77 공과대학 6호관 517호
(용봉동)

김택원

서울 관악구 관악로 1, 공과대학 301동 616호 (신림동, 서울대학교)

임종인

서울특별시 성북구 안암로 145 미래융합기술관 611호 (안암동5가)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1415128860

부처명 교육과학기술부

연구관리전문기관 정보통신산업진흥원

연구사업명 정보통신기술인력양성

연구과제명 스마트 그리드 기술연구

기 여 율 1/1

주관기관 고려대학교 산학협력단

연구기간 2013.01.01 ~ 2013.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

분산전원모델링부가 출력필터에 기초하여 분산전원(Distributed Generation)의 종류를 판단하는 단계;
상전류계산부가 상기 분산전원의 정상상태에서 출력되는 상 전류를 계산하는 단계; 및
조류계산부가 상기 상 전류에 기초하여 상기 분산전원의 전력 조류를 계산하는 단계;
를 포함하는 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 분산전원모델링부가 분산전원의 종류를 판단하는 단계는
상기 출력필터의 토폴로지에 기초하여 분산전원의 종류를 판단하는 것을 특징으로 하는 분산전원 연계에 따른
배전계통의 조류 계산 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,
상기 출력필터는
L 필터, LC 필터, LCL 필터 중 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 분산전원 연계에 따른 배전계통의
조류 계산 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,
상기 상전류계산부가 상 전류를 계산하는 단계는
상기 출력필터가 L 필터인 경우, 그리드 전류를 계산하는 것을 특징으로 하는 분산전원 연계에 따른 배전계통의
조류 계산 방법.

청구항 5

제3항에 있어서,
상기 상전류계산부가 상 전류를 계산하는 단계는
상기 출력필터가 LC 필터 또는 LCL 필터인 경우, 전압원 전류 또는 그리드 전류를 계산하는 것을 특징으로 하는
분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 조류계산부가 상기 분산전원의 전력 조류를 계산하는 단계는
 상기 분산전원과 연결된 버스의 종류를 판단하는 과정;
 판단된 버스 중 부하 버스의 무효전력을 계산하는 과정;
 상기 분산전원에 연결된 모선의 전류 불일치 또는 전압 불일치를 판단하는 과정; 및
 상기 전압 불일치에 대한 벡터와 상기 무효전력에 대한 벡터간 야코비 행렬(Jacobian matrix) 을 연산하는 과정;
 을 포함하는 것을 특징으로 하는 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법.

청구항 7

제1항 내지 제6항 중 어느 한 항에 따른 방법을 컴퓨터로 실행하기 위한 프로그램이 기록된 컴퓨터 판독가능 기록매체.

청구항 8

출력필터에 기초하여 분산전원(Distributed Generation)의 종류를 판단하는 분산전원모델링부;
 상기 분산전원의 정상상태에서 출력되는 상 전류를 계산하는 상전류계산부; 및
 상기 상 전류에 기초하여 상기 분산전원의 전력 조류를 계산하는 조류계산부;
 를 포함하는 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서,
 상기 출력필터는
 L 필터, LC 필터, LCL 필터 중 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템.

청구항 10

제8항에 있어서,
 상기 분산전원에 연결된 모선이 부하 모선 또는 PV 모선으로 이루어지는 것을 특징으로 하는 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템에 관한 것으로, 특히 분산전원이 연계된 배전계통을 안정화시킬 수 있는 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002]

최근 들어, 화석연료가 고갈되고, 지구 온난화에 따라 환경오염을 줄이기 위한 목적으로 종래의 화석연료 대신 전기 에너지를 구동 에너지로 사용하는 전기 자동차에 대한 관심이 높아지고 있다. 이처럼 전기 자동차에 대한

관심이 높아질수록 전력을 충전하는 배터리 관련 기술도 함께 관심을 모으고 있다.

- [0003] 전기 자동차를 구동시키기 위해, 배터리의 전력 충전이 이루어지는데, 전력 충전 과정에서 충전 비용이 비싸다는 단점이 발생하였고, 뿐만 아니라, 전기 자동차의 사용이 많아질수록 동일한 시간 예를 들면, 출퇴근 시간에 전기 자동차의 전력 충전이 한꺼번에 몰릴 수 있어, 충전이 여의치 못하다는 어려움이 발생했다.
- [0004] 이러한 어려움을 해결하기 위해, 전기 자동차의 전력 충방전에 스마트 기술을 접목하는 기술이 연구되고 있다. 스마트 그리드(Smart Grid)란, 전력망에 IT 기술을 결합하여 에너지 이용을 최적화하는 차세대 전력망을 나타낸다. 이러한 스마트 그리드 기술은 지능형 송전망, 지능형 배전망 등과 같이 전력설비를 지능화함으로써, 전력설비에 대한 실시간 모니터링 및 제어가 가능해짐에 따라, 고품질의 전기를 더욱 안정적으로 공급할 수 있고, 최적의 부하제어를 통한 설비의 효율화를 이루어 운영비용을 절감할 수 있는 장점을 갖는다.
- [0005] 특히, 이러한 스마트 그리드에서 가장 중요한 역할을 하게 되는 부분은 분산전원으로서의 소형열병합발전과 신재생에너지 전원이다. 하지만 신재생에너지를 이용하여 전력을 생산하는 것은 생산량에 비하여 너무 과다한 투자비가 소요되는 문제점이 발생했다. 또한 신재생에너지로 부터의 발전은 요금이 고가인 피크부하 시간대에 적정하게 맞추어 전기를 생산할 수 있는 조건이 어렵기 때문에 분산발전장치로서의 역할을 제대로 수행하기가 어려웠다.
- [0006] 따라서, 소형 열병합발전장치를 이용하는 경우, 피크부하시간대에 발전하여 공급이 가능하고 요금이 저렴한 저부하시간대에는 가동을 멈출 수가 있어, 원하는 시간대에 전력을 생산하고 공급할 수 있다는 장점이 있다.
- [0007] 이에 따라 소형 열병합발전장치의 배전계통에서 분산전원을 연계하는 기술이 대두되고 있다. 하지만, 분산전원(특히 inverter-interfaced DGs)은 기존의 발전기들의 특징과 매우 다르기 때문에, 분산전원의 동작 특징을 고려해야하는 것이 중요하다.
- [0008] 특히, 분산전원의 동작 특징 중 전력 조류 계산은 배전계통의 각 지점에서 전압, 전류 전력이 어떤 분포를 이루고 있는지 판단하는 전력 조류 계산을 통해 분산전원의 특징을 용이하게 파악할 수 있다.
- [0009] 하지만 이러한 조류 계산은 배전계통의 동작조건이 기본적으로 불균형이기 때문에 불균형 동작조건에서 상 전압에 따라 분산전원의 상이 달라지기 때문에 분산전원이 연계된 배전계통을 안정화시키기 어려운 문제점이 발생했다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 상기와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위해, 본 발명은 불균형 동작조건에서도 분산전원의 상이 달라지는 것을 방지함으로써, 분산전원이 연계된 배전계통을 안정화시킬 수 있는 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

- [0011] 위와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명의 한 실시 예에 따른 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법은 분산전원모델링부가 출력필터에 기초하여 분산전원(Distributed Generation)의 종류를 판단하는 단계; 상전류계산부가 상기 분산전원의 정상상태에서 출력되는 상 전류를 계산하는 단계; 및 조류계산부가 상기 상 전류에 기초하여 상기 분산전원의 전력 조류를 계산하는 단계; 를 포함한다.
- [0012] 보다 바람직하게는 상기 출력필터의 토폴로지에 기초하여 분산전원의 종류를 판단하는 분산전원모델링부가 분산전원의 종류를 판단하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0013] 특히, L 필터, LC 필터, LCL 필터 중 적어도 하나를 포함하는 출력필터를 포함할 수 있다.
- [0014] 보다 바람직하게는 상기 출력필터가 L 필터인 경우, 그리드 전류를 계산하는 상전류계산부가 상 전류를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0015] 보다 바람직하게는 상기 출력필터가 LC 필터 또는 LCL 필터인 경우, 전압원 전류 또는 그리드 전류를 계산하는

상전류계산부가 상 전류를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0016] 보다 바람직하게는 상기 분산전원과 연결된 버스의 종류를 판단하는 과정; 판단된 버스 중 부하 버스의 무효전력을 계산하는 과정; 상기 분산전원에 연결된 모선의 전류 불일치 또는 전압 불일치를 판단하는 과정; 및 상기 전압 불일치에 대한 벡터와 상기 무효전력에 대한 벡터간 야코비 행렬(Jacobian matrix) 을 연산하는 과정;을 포함하는 조류계산부가 상기 분산전원의 전력 조류를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0017] 위와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명의 한 실시 예에 따른 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템은 출력필터에 기초하여 분산전원(Distributed Generation)의 종류를 판단하는 분산전원모델링부; 상기 분산전원의 정상상태에서 출력되는 상 전류를 계산하는 상전류계산부; 및 상기 상 전류에 기초하여 상기 분산전원의 전력 조류를 계산하는 조류계산부;를 포함한다.

[0018] 특히, L 필터, LC 필터, LCL 필터 중 적어도 하나를 포함하는 출력필터를 포함할 수 있다.

[0019] 특히, 상기 분산전원에 연결된 모선이 부하 모선 또는 PV 모선으로 이루어질 수 있다.

발명의 효과

[0020] 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템은 배전계통의 분산전원이 연계된 지점에서 전압 및 전류 전력의 분포를 정확하게 판단할 수 있어, 분산전원이 연계된 배전계통을 안정화시킬 수 있는 효과가 있다.

[0021] 또한 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템은 배전계통의 불균형 동작조건에서도 분산전원의 상이 달라지는 것을 방지할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0022] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 따른 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템의 블록도이다.

도 2는 벡터제어에 따른 분산전원의 전력 제어 블록도이다.

도 3은 분산전원의 종류를 나타낸 표이다.

도 4는 세 개의 분산전원이 연계된 방사형 계통과 이에 따른 야코비안 행렬 구조를 나타낸 도면이다.

도 5는 전압 벡터 및 전류 벡터를 나타낸 그래프이다.

도 6은 버스 결정과정을 나타낸 도면이다.

도 7은 IEEE 13- 버스 시스템을 나타낸 도면이다.

도 8은 분산전원의 변수 값을 정리한 표이다.

도 9는 PSCAD에서 측정된 각 상에서의 유효전력과 무효전력의 값을 나타낸 그래프이다.

도 10은 전압의 크기와 위상각 차이의 최대값을 나타낸 그래프이다.

도 11은 PSCAD 모델과 분산전압을 이용한 조류 계산을 비교한 그래프이다.

도 12는 PSCAD 모델과 분산전압을 이용한 조류 계산을 비교한 그래프이다.

도 13은 PSCAD 모델을 기준전압과 정상전압 및 각 상의 전압을 측정한 값을 나타낸 그래프이다.

도 14는 분산전원의 주요 변수를 나타낸 표이다.

도 15는 분산전원의 개수에 따른 세 경우의 반복 연산 횟수를 나타낸 그래프이다.

도 16은 분산전원의 개수에 따른 세 경우의 반복 연산 횟수를 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 이하, 본 발명을 바람직한 실시 예와 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식

을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며, 여기에서 설명하는 실시 예에 한정되는 것은 아니다.

- [0024] 이하, 도 1을 참조하여 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템에 대하여 자세히 살펴보고도록 한다.
- [0025] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 따른 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템의 블록도이다.
- [0026] 도 1에 도시된 바와 같이, 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템(100)은 분산전원모델링부(120), 상전류계산부(140) 및 조류계산부(160)를 포함한다.
- [0027] 분산전원모델링부(120)는 출력필터에 기초하여 분산전원(Distributed Generation)의 종류를 판단한다. 이러한 상기 출력필터는 L 필터, LC 필터, LCL 필터 중 적어도 하나를 포함할 수 있다. 또한 상기 분산전원에 연결된 모선이 부하 모선 또는 PV 모선으로 이루어질 수 있다.
- [0028] 상전류계산부(140)는 상기 분산전원의 정상상태에서 출력되는 상 전류를 계산한다.
- [0029] 조류계산부(160)는 상기 상 전류에 기초하여 상기 분산전원의 전력 조류를 계산한다.
- [0030] 이하에서는 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법에 대하여 자세히 살펴보고도록한다.
- [0031] 먼저, 분산전원모델링부가 출력필터에 기초하여 분산전원(Distributed Generation)의 종류를 판단하는데, 특히 L 필터, LC 필터, LCL 필터 중 적어도 하나를 포함하는 출력필터의 토폴로지에 기초하여 분산전원의 종류를 판단할 수 있다.
- [0032] 상전류계산부가 상기 분산전원의 정상상태에서 출력되는 상 전류를 계산한다. 특히, 상기 출력필터가 L 필터인 경우에, 상기 상전류계산부가 그리드 전류를 계산할 수 있다. 또는 상기 출력필터가 LC 필터 또는 LCL 필터인 경우, 전압원 전류 또는 그리드 전류를 계산할 수 있다.
- [0033] 이어서, 조류계산부가 상기 상 전류에 기초하여 상기 분산전원의 전력 조류를 계산한다. 이러한 분산전원의 조류 계산과정을 자세히 살펴보면, 먼저 상기 분산전원과 연결된 버스의 종류를 판단한 후, 판단된 버스 중 부하 버스의 무효전력을 계산한다. 이어서 상기 분산전원에 연결된 모선의 전류 불일치 또는 전압 불일치를 판단하여, 상기 전압 불일치에 대한 벡터와 상기 무효전력에 대한 벡터간 야코비 행렬(Jacobian matrix) 을 연산한다.
- [0034] 이하, 구체적인 실시 예를 통해 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 시스템 및 방법에 대하여 자세히 살펴보고도록 한다.
- [0035] 벡터제어 분산전원은 단상 출력보다는 삼상 출력을 제어하기 때문에, TCIM 조류계산에서 분산전원을 표현하기 위해 a-b-c 상 출력이 모델링되어야 한다. 따라서, 출력필터와 전류제어 지점의 토폴로지에 따라 분산전원이 세 가지 종류로 분류된다. 정상상태 상 전류 출력 식은 각각의 종류에 따라 표현될 수 있다.
- [0036] 벡터제어 방법은 유효전력과 무효전력이 독립적으로 제어될 수 있으므로, VSC가 사용된 분산전원의 출력을 제어하기 위해 널리 사용된다.
- [0037] 도 2는 벡터제어에 따른 분산전원의 전력 제어 블록도이다.
- [0038] 도 2(a)에 도시된 바와 같이, 삼상 유효전력과 무효전력 레퍼런스값은 d와 q축 전류의 레퍼런스 값을 계산하기 위해 사용되며, 또 다른 옵션으로 dc링크 전압은 유효전력 제어를 위해 사용되고, 삼상 ac전압은 무효전력 제어를 위해 사용된다.
- [0039] 도 2(b)를 통해 출력필터의 토폴로지에 의해 결정된 세 가지 다른 분산전원 형태를 확인할 수 있다.
- [0040] 도 2(b)에 도시된 바와 같이, L 필터가 있는 분산전원에서는 전류제어기가 그리드 쪽 전류(I_{dg})를 제어한다. 반면에 LC나 LCL 필터[20,22,23]가 있는 분산전원에서는 VSC 출력전류(I_{vsc})나 I_{dg} 가 제어 변수로 사용된다.
- [0041] 정상상태에서, d축과 q축 전류가 제어기에 의해 지정된 값으로 유지되어 있으므로, 전류 제어 지점에서의 a-b-c 상 전류는 균형상태이다. 따라서 분산전원의 정상상태 출력은 삼상 균형 전류 소스(BTCS)로 모델링될 수 있다.
- [0042] 도 3은 분산전원의 종류를 나타낸 표이다.
- [0043] 도 3에 도시된 바와 같이, 출력필터의 토폴로지와 제어하는 전류에 따라 정상상태 분산전원(DG) 모델의 세 가지

종류를 확인할 수 있다. Type1, 2 분산전원(DG)의 정상상태 상 전류 출력 식은 Type 3 분산전원(DG)모델의 식을 변형해서 얻을 수 있기 때문에, Type 3 분산전원(DG)의 전류 출력 모델을 먼저 획득한다.

BTCs의 상 전류 출력은 하기의 수학적 식 1 내지 3과 같다.

$$I_{BTCs}^a = |I_{BTCs}| e^{j\theta} \quad (1)$$

$$I_{BTCs}^b = |I_{BTCs}| e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3})} = I_{BTCs}^a e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (2)$$

$$I_{BTCs}^c = |I_{BTCs}| e^{j(\theta + \frac{2\pi}{3})} = I_{BTCs}^a e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (3)$$

$|I_{BTCs}|$ 과 θ 는 각각 a상의 전류 페이저의 크기와 위상각을 나타낸다. 도 3에 도시된 등가회로(equivalent circuit)로부터, 모선 k에 연결된 type 3 분산전원(DG)의 s상 출력 전류는 하기의 수학적 식 4와 같이 표현될 수 있다.

$$I_{DG,k}^s = \frac{R_d + jX_c}{R_{eq,k} + jX_{eq,k}} I_{BTCs}^s - \frac{V_k^s}{R_{eq,k} + jX_{eq,k}} \quad (4)$$

여기서 V_k^s 는 모선 k에서 s상의 전압이고, $R_{eq,k}$ 와 $X_{eq,k}$ 는 출력필터의 등가저항과 리액턴스이며, 하기의 수학적 식 5 내지 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{eq,k} = R_d + R_2 \quad (5)$$

$$X_{eq,k} = X_c + X_{L2} \quad (6)$$

분산전원의 삼상 복소전력 출력은 하기의 수학적 식 7과 같이, 각 상의 전력 합과 같다.

$$P_{DG,k}^{3\phi} + jQ_{DG,k}^{3\phi} = V_k^a (I_{DG,k}^a)^* + V_k^b (I_{DG,k}^b)^* + V_k^c (I_{DG,k}^c)^* \quad (7)$$

이때, 위첨자 *는 켤레복소수를 나타낸다. 상기 수학적식(1) 내지 수학적식 (3)을 수학적식 (4)에 대입하고, 수학적식 (1) 내지 (3)을 수학적식(7)에 대입함으로써 삼상 복소전력 출력은 하기의 수학적식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{DG,k}^{3\phi} + jQ_{DG,k}^{3\phi} = 3 \frac{R_d - jX_c}{R_{eq,k} - jX_{eq,k}} V_k^+ (I_{BTCs}^a)^* - \frac{|V_k^a|^2 + |V_k^b|^2 + |V_k^c|^2}{R_{eq,k} - jX_{eq,k}} \quad (8)$$

여기서 V_k^+ 는 positive sequence 전압을 나타내며, 하기의 수학적식 9와 같이 정의된다.

$$V_k^+ = \frac{V_k^a + V_k^b e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_k^c e^{-j\frac{2\pi}{3}}}{3} \quad (9)$$

이후, 상기 수학적식(8)을 다시 정리하여 하기의 수학적식 10에 의해 BTCs의 상 a에서 전류 출력이 계산될 수 있다.

$$I_{BTCs}^a = \frac{(P_{DG,k}^{3\phi} - jQ_{DG,k}^{3\phi})(R_{eq,k} + jX_{eq,k}) + |V_k^a|^2 + |V_k^b|^2 + |V_k^c|^2}{3(V_k^+)^*(R_d + jX_c)} \quad (10)$$

마지막으로, 상 전류 출력은 삼상 유효전력과 무효전력, 상 전압 및 출력필터의 임피던스의 함수로 표현될 수 있고, 상기의 수학적식 (10)을 수학적식 (1) 내지 (3)에 대입하고 수학적식 (1) 내지(3)을 수학적식 (4)에 대입하면 하

기의 수학적식 (11) 내지 (13)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{DG,k}^a = \frac{P_{DG,k}^{3\phi} - jQ_{DG,k}^{3\phi}}{3(V_k^+)^*} + \frac{(R_{eq,k} + jX_{eq,k})(|V_k^a|^2 + |V_k^b|^2 + |V_k^c|^2)}{3(V_k^+)^*} - \frac{V_k^a}{R_{eq,k} + jX_{eq,k}} \quad (11)$$

$$I_{DG,k}^b = \frac{P_{DG,k}^{3\phi} - jQ_{DG,k}^{3\phi}}{3(V_k^+)^*} e^{-j\frac{2}{3}\pi} + \frac{(R_{eq,k} + jX_{eq,k})(|V_k^a|^2 + |V_k^b|^2 + |V_k^c|^2)}{3(V_k^+)^*} e^{-j\frac{2}{3}\pi} - \frac{V_k^b}{R_{eq,k} + jX_{eq,k}} \quad (12)$$

$$I_{DG,k}^c = \frac{P_{DG,k}^{3\phi} - jQ_{DG,k}^{3\phi}}{3(V_k^+)^*} e^{j\frac{2}{3}\pi} + \frac{(R_{eq,k} + jX_{eq,k})(|V_k^a|^2 + |V_k^b|^2 + |V_k^c|^2)}{3(V_k^+)^*} e^{j\frac{2}{3}\pi} - \frac{V_k^c}{R_{eq,k} + jX_{eq,k}} \quad (13)$$

Type 1 분산전원(DG)에서는 병렬 또는 직렬 임피던스가 없기 때문에, 수학적식 (11) 내지 (13)의 첫 번째 항만이 사용된다. 즉, Type 1 분산전원(DG)는 전압이 불균형인 상황에서도 삼상 균형 전류를 흘려보낸다. Type 2 분산전원(DG)의 전류 출력 식은 $R_{eq,k}$ 가 R_u 와 같고 $X_{eq,k}$ 가 X_c 와 같다는 것만 제외하고는 상기 수학적식 (11) 내지 (13)과 그 형태가 같다.

또한 조류계산 과정에서 분산전원이 연결된 모선은 분산전원의 무효전력 제어 모드에 따라 부하 모선(PQ 모선) 또는 PV 모선으로 모델링될 수 있다. 하지만 기존의 모선 모델과는 다르게 주어진 값들이 삼상 값들이다. PQ 모선의 삼상 유효전력과 무효전력, PV 모선의 삼상 유효전력과 positive-sequence 전압이 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산을 연산하는데 사용된다.

Type 2와 3 분산전원(DG) 모델(같은 상 전류 출력 식을 가지고 있다.)의 조류계산을 먼저 설명하고, 이어서, Type 1 분산전원(DG) 모델을 위한 변형된 조류계산 방법을 설명하도록 한다.

분산전원의 상 전류 출력을 고려함에 따라 직교 좌표계 형태로 표현된 k 모선의 s 상에서의 전류 불일치 식은 하기의 수학적식 14 내지 15와 같이 정의된다.

$$\Delta I_{r,k}^s = \sum_{i=1}^n \sum_{j=a,b,c} (G_{ki}^{ss} V_{r,j}^s - B_{ki}^{ss} V_{m,j}^s) - \frac{P_k^s V_{r,k}^s + Q_k^s V_{m,k}^s}{(V_{r,k}^s)^2 + (V_{m,k}^s)^2} - I_{DG,r,k}^s \quad (14)$$

$$\Delta I_{m,k}^s = \sum_{i=1}^n \sum_{j=a,b,c} (G_{ki}^{ss} V_{m,j}^s + B_{ki}^{ss} V_{r,j}^s) - \frac{P_k^s V_{m,k}^s - Q_k^s V_{r,k}^s}{(V_{r,k}^s)^2 + (V_{m,k}^s)^2} - I_{DG,m,k}^s \quad (15)$$

where:

$\Delta I_{r,k}^s, \Delta I_{m,k}^s$	real and imaginary parts of current mismatch;
G_{ki}^{ss}, B_{ki}^{ss}	real and imaginary parts of bus admittance matrix;
$V_{r,k}^s, V_{m,k}^s$	real and imaginary parts of phase voltage;
P_k^s, Q_k^s	active and reactive power injections of load;
$I_{DG,r,k}^s, I_{DG,m,k}^s$	real and imaginary parts of output current of the DG.

상기 수학적식 14내지 15의 마지막 항은 분산전원의 전류 주입을 표현하기 위해 새롭게 도입되었고, 수학적식 11 내지 13으로부터 하기의 수학적식 16 내지 24와 같이 계산된다:

$$I_{DG,r,k}^a = \frac{\alpha_k(P_{DG,k}^{3\phi} + R_{eq,k}\gamma_k) + \beta_k(Q_{DG,k}^{3\phi} + X_{eq,k}\gamma_k)}{\alpha_k^2 + \beta_k^2} - \frac{R_{eq,k}V_{r,k}^a + X_{eq,k}V_{m,k}^a}{R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2} \quad (16)$$

$$I_{DG,m,k}^a = \frac{-\alpha_k(Q_{DG,k}^{3\phi} + X_{eq,k}\gamma_k) + \beta_k(P_{DG,k}^{3\phi} + R_{eq,k}\gamma_k)}{\alpha_k^2 + \beta_k^2} - \frac{R_{eq,k}V_{m,k}^a - X_{eq,k}V_{r,k}^a}{R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2} \quad (17)$$

$$I_{DG,r,k}^b = \frac{(-\alpha_k + \sqrt{3}\beta_k)(P_{DG,k}^{3\phi} + R_{eq,k}\gamma_k) - (\sqrt{3}\alpha_k + \beta_k)(Q_{DG,k}^{3\phi} + X_{eq,k}\gamma_k)}{2(\alpha_k^2 + \beta_k^2)} - \frac{R_{eq,k}V_{r,k}^b + X_{eq,k}V_{m,k}^b}{R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2} \quad (18)$$

$$I_{DG,m,k}^b = \frac{(-\sqrt{3}\alpha_k - \beta_k)(P_{DG,k}^{3\phi} + R_{eq,k}\gamma_k) + (\alpha_k - \sqrt{3}\beta_k)(Q_{DG,k}^{3\phi} + X_{eq,k}\gamma_k)}{2(\alpha_k^2 + \beta_k^2)} - \frac{R_{eq,k}V_{m,k}^b - X_{eq,k}V_{r,k}^b}{R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2} \quad (19)$$

$$I_{DG,r,k}^c = \frac{(-\alpha_k - \sqrt{3}\beta_k)(P_{DG,k}^{3\phi} + R_{eq,k}\gamma_k) + (\sqrt{3}\alpha_k - \beta_k)(Q_{DG,k}^{3\phi} + X_{eq,k}\gamma_k)}{2(\alpha_k^2 + \beta_k^2)} - \frac{R_{eq,k}V_{r,k}^c + X_{eq,k}V_{m,k}^c}{R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2} \quad (20)$$

$$I_{DG,m,k}^c = \frac{(\sqrt{3}\alpha_k - \beta_k)(P_{DG,k}^{3\phi} + R_{eq,k}\gamma_k) + (\alpha_k + \sqrt{3}\beta_k)(Q_{DG,k}^{3\phi} + X_{eq,k}\gamma_k)}{2(\alpha_k^2 + \beta_k^2)} - \frac{R_{eq,k}V_{m,k}^c - X_{eq,k}V_{r,k}^c}{R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2} \quad (21)$$

$$\alpha_k = V_{r,k}^a - \frac{1}{2}V_{r,k}^b - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{m,k}^b - \frac{1}{2}V_{r,k}^c + \frac{\sqrt{3}}{2}V_{m,k}^c \quad (22)$$

$$\beta_k = V_{m,k}^a - \frac{1}{2}V_{m,k}^b + \frac{\sqrt{3}}{2}V_{r,k}^b - \frac{1}{2}V_{m,k}^c - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{r,k}^c \quad (23)$$

$$\gamma_k = \frac{(V_{r,k}^a)^2 + (V_{m,k}^a)^2 + (V_{r,k}^b)^2 + (V_{m,k}^b)^2 + (V_{r,k}^c)^2 + (V_{m,k}^c)^2}{R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2} \quad (24)$$

또한 PV 모선을 나타내기 위해, 삼상 전압 불일치 식이 정의되어야 한다. 분산전원은 일반적으로 positive-sequence 전압의 크기를 제어하기 때문에, 모선 k에서 전압 불일치 식은 하기의 수학식 25와 같이 정의된다:

$$\Delta V_k^+ = |V_k^+| - V_{ref,k}^+ \quad (25)$$

여기서 $V_{ref,k}^+$ 는 positive-sequence 전압 크기의 레퍼런스 값을 나타낸다; 그리고 $|V_k^+|$ 는 조류계산으로 얻은 positive-sequence 전압의 크기이다:

$$|V_k^+| = \frac{\sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}}{3} \quad (26)$$

조류계산을 위해, 상기 수학식 14 내지 15 및 25에서 정의된 불일치 값들을 0으로 만드는 전압을 찾는 것이 중요하다.

이러한 조류계산을 Newton-Raphson 방법으로 풀기 위해, 전류 불일치 벡터(ΔI_{nr})와 전압 벡터(V_{rm})는 하기의 수학식 27 내지 28과 같이 정의된다.

$$\Delta I_{nr} = [\Delta I_{m,2}^a \quad \Delta I_{r,2}^a \quad \Delta I_{m,2}^b \quad \Delta I_{r,2}^b \quad \dots \quad \Delta I_{m,n}^c \quad \Delta I_{r,n}^c]^t \quad (27)$$

$$V_{rm} = [V_{r,2}^a \quad V_{m,2}^a \quad V_{r,2}^b \quad V_{m,2}^b \quad \dots \quad V_{r,n}^c \quad V_{m,n}^c]^t \quad (28)$$

특히, 모선 1은 기준 버스로 간주되기 때문에, 모선 1의 전류 불일치와 전압은 상기 수학식 27 내지 28에 포함되지 않는다. 이때, 전류 불일치 벡터와 전압 벡터에서 실수부와 허수부의 순서가 바뀐다.

따라서, 삼상 무효전력 벡터가 PV 모선을 표현하기 위해 도입되며, 삼상 전압 불일치 벡터(ΔV^+)와 삼상 무효 전력 벡터($Q^{3\phi}$)는 하기의 수학식 29 내지 30과 같이 정의된다.

$$\Delta V^+ = [\Delta V_1^+ \quad \dots \quad \Delta V_l^+]^T \quad (29)$$

$$Q^{3\phi} = [Q_{DG,k}^{3\phi} \quad \dots \quad Q_{DG,l}^{3\phi}]^T \quad (30)$$

Newton-Raphson 방법의 h번째 반복과정을 통해, 상태변수 벡터 V_{rm} 과 $Q^{3\phi}$ 는 불일치 벡터 ΔI_{mr} 와 ΔV^+ 를 이용하여 하기의 수학적 식 31과 같이 업데이트된다:

$$\begin{bmatrix} V_{rm} \\ Q^{3\phi} \end{bmatrix}^{h+1} = \begin{bmatrix} V_{rm} \\ Q^{3\phi} \end{bmatrix}^h - [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta I_{mr} \\ \Delta V^+ \end{bmatrix}^h \quad (31)$$

이때, 상기 J는 야코비안 행렬을 나타낸다. 이러한 야코비안 행렬은 상태변수 벡터와 불일치 벡터 사이의 민감도 행렬을 말한다.

상기 야코비안 행렬은 하기의 수학적 식 32와 같이 부분이 나뉘어진다:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{mr}}{\partial V_{rm}} = A & \frac{\partial \Delta I_{mr}}{\partial Q^{3\phi}} = B \\ \frac{\partial \Delta V^+}{\partial V_{rm}} = C & \frac{\partial \Delta V^+}{\partial Q^{3\phi}} = O \end{bmatrix} \quad (32)$$

삼상 전압 불일치와 삼상 무효전력 사이에 양함수 방정식이 없기 때문에, 연쇄법칙을 통해 해당하는 부분행렬이 하기의 수학적 식 33과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial \Delta V^+}{\partial Q^{3\phi}} = \left[\frac{\partial \Delta V^+}{\partial V_{rm}} \right] \left[\frac{\partial \Delta I_{mr}}{\partial V_{rm}} \right]^{-1} \left[\frac{\partial \Delta I_{mr}}{\partial Q^{3\phi}} \right] \quad (33)$$

하지만, 만약 상기 수학적 식 33으로부터 얻은 부분행렬이 사용되는 경우, 야코비안 행렬이 full rank를 가지지 못하고, 그 결과 역행렬을 가지지 않는다. 이러한 문제가 발생하는 것을 사전에 방지하기 위해서, 부분행렬은 상기 수학적 식 32에 기재된 바와 같이 영행렬로 대체된다.

도 4는 세 개의 분산전원이 연계된 방사형 계통과 이에 따른 야코비안 행렬 구조를 나타낸 도면이다.

도 4에 도시된 바와 같이, 네 개의 모선(기준 모선은 제외)이 있고, 각각의 모선은 전류 불일치와 직교 좌표로 표현된 전압을 포함하는 여섯 개의 항이 있기 때문에, ΔI_{mr} 과 V_{rm} 은 24×1 열벡터이다. 두 개의 분산전원(DG 1과 DG 3)이 전압 제어 모드로 동작하기 때문에, $Q^{3\phi}$ 와 ΔV^+ 는 2×1 열벡터이다. 따라서 야코비안 행렬은 26×26 행렬이 된다.

상기 야코비안 행렬에서 A, B, C 부분행렬들은 각각 6×6 행렬, 6×1 열벡터, 1×6 행벡터이다. 분산전원의 삼상 무효전력은 오직 분산전원이 연결된 모선의 전류 불일치에 의해서만 영향을 받으므로, B_3 과 B_6 는 0이 아닌 값을 가지고, B의 다른 벡터들은 0벡터가 된다. 이와 유사하게, C_3 과 C_6 는 C에서 유일한 0이 아닌 벡터들이다.

행렬 A의 원소들은 상기 수학적 식 14 내지 15 식을 사각파(rectangular voltage)의 관점에서 편미분하면 계산할 수 있다. 비대각 블록들의 원소들을 계산하기 위해서는 이 원소들이 분산전원(DG)의 현재 결과값과는 관계가 없기 때문에, 원래의 TCIM의 수학적 식 12를 수정하지 않고 사용할 수 있다. 반면에 대각 블록의 원소들은 하기의 수학적 식 34과 같이 수정되어야 한다.

$$A_{kk} = A_{kk,O} - A_{kk,DG} \quad (34)$$

$A_{kk,0}$ 은 수학적식 13과 동일한 행렬이며, $A_{kk,DG}$ 는 분산전원(DG)의 현재 결과 값의 편미분 값이다.

$$A_{kk,DG} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{DG,m,k}^a}{\partial V_{r,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^a}{\partial V_{m,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^a}{\partial V_{r,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^a}{\partial V_{m,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^a}{\partial V_{r,k}^c} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^a}{\partial V_{m,k}^c} \\ \frac{\partial I_{DG,r,k}^a}{\partial V_{r,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^a}{\partial V_{m,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^a}{\partial V_{r,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^a}{\partial V_{m,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^a}{\partial V_{r,k}^c} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^a}{\partial V_{m,k}^c} \\ \frac{\partial I_{DG,m,k}^b}{\partial V_{r,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^b}{\partial V_{m,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^b}{\partial V_{r,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^b}{\partial V_{m,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^b}{\partial V_{r,k}^c} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^b}{\partial V_{m,k}^c} \\ \frac{\partial I_{DG,r,k}^b}{\partial V_{r,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^b}{\partial V_{m,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^b}{\partial V_{r,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^b}{\partial V_{m,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^b}{\partial V_{r,k}^c} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^b}{\partial V_{m,k}^c} \\ \frac{\partial I_{DG,m,k}^c}{\partial V_{r,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^c}{\partial V_{m,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^c}{\partial V_{r,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^c}{\partial V_{m,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^c}{\partial V_{r,k}^c} & \frac{\partial I_{DG,m,k}^c}{\partial V_{m,k}^c} \\ \frac{\partial I_{DG,r,k}^c}{\partial V_{r,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^c}{\partial V_{m,k}^a} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^c}{\partial V_{r,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^c}{\partial V_{m,k}^b} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^c}{\partial V_{r,k}^c} & \frac{\partial I_{DG,r,k}^c}{\partial V_{m,k}^c} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$A_{kk,DG}$ 의 원소들은 수학적식(16) 내지 (21)을 편미분 하여 하기의 수학적식 36 내지 44를 얻을 수 있다.

$$A_{kk,DG} = \frac{1}{2(\alpha_k^2 + \beta_k^2)} \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 \\ -f_2 & f_1 & -f_4 & f_3 & -f_6 & f_5 \\ f_3 & f_4 & f_3 & f_6 & f_1 & f_2 \\ -f_4 & f_3 & -f_6 & f_5 & -f_2 & f_1 \\ f_5 & f_6 & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \\ -f_6 & f_5 & -f_2 & f_1 & -f_4 & f_3 \end{bmatrix} - \frac{1}{R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2} \begin{bmatrix} -X_{eq,k} & R_{eq,k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_{eq,k} & X_{eq,k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -X_{eq,k} & R_{eq,k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{eq,k} & X_{eq,k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{eq,k} & R_{eq,k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{eq,k} & X_{eq,k} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$+ \begin{bmatrix} 2h_1 V_{r,k}^a & 2h_1 V_{m,k}^a & 2h_1 V_{r,k}^b & 2h_1 V_{m,k}^b & 2h_1 V_{r,k}^c & 2h_1 V_{m,k}^c \\ 2h_2 V_{r,k}^a & 2h_2 V_{m,k}^a & 2h_2 V_{r,k}^b & 2h_2 V_{m,k}^b & 2h_2 V_{r,k}^c & 2h_2 V_{m,k}^c \\ - (h_1 + \sqrt{3}h_2) V_{r,k}^a & - (h_1 + \sqrt{3}h_2) V_{m,k}^a & - (h_1 + \sqrt{3}h_2) V_{r,k}^b & - (h_1 + \sqrt{3}h_2) V_{m,k}^b & - (h_1 + \sqrt{3}h_2) V_{r,k}^c & - (h_1 + \sqrt{3}h_2) V_{m,k}^c \\ (\sqrt{3}h_1 - h_2) V_{r,k}^a & (\sqrt{3}h_1 - h_2) V_{m,k}^a & (\sqrt{3}h_1 - h_2) V_{r,k}^b & (\sqrt{3}h_1 - h_2) V_{m,k}^b & (\sqrt{3}h_1 - h_2) V_{r,k}^c & (\sqrt{3}h_1 - h_2) V_{m,k}^c \\ - (h_1 - \sqrt{3}h_2) V_{r,k}^a & - (h_1 - \sqrt{3}h_2) V_{m,k}^a & - (h_1 - \sqrt{3}h_2) V_{r,k}^b & - (h_1 - \sqrt{3}h_2) V_{m,k}^b & - (h_1 - \sqrt{3}h_2) V_{r,k}^c & - (h_1 - \sqrt{3}h_2) V_{m,k}^c \\ - (\sqrt{3}h_1 + h_2) V_{r,k}^a & - (\sqrt{3}h_1 + h_2) V_{m,k}^a & - (\sqrt{3}h_1 + h_2) V_{r,k}^b & - (\sqrt{3}h_1 + h_2) V_{m,k}^b & - (\sqrt{3}h_1 + h_2) V_{r,k}^c & - (\sqrt{3}h_1 + h_2) V_{m,k}^c \end{bmatrix}$$

where:

$$f_1 = -4\alpha_k \beta_k (P_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k R_{eq,k}) + 2(\alpha_k^2 - \beta_k^2)(Q_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k X_{eq,k}) \quad (37)$$

$$f_2 = 2(\alpha_k^2 - \beta_k^2)(P_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k R_{eq,k}) + 4\alpha_k \beta_k (Q_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k X_{eq,k}) \quad (38)$$

$$f_3 = (\sqrt{3}\alpha_k^2 + 2\alpha_k \beta_k - \sqrt{3}\beta_k^2)(P_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k R_{eq,k}) - (\alpha_k^2 - 2\sqrt{3}\alpha_k \beta_k - \beta_k^2)(Q_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k X_{eq,k}) \quad (39)$$

$$f_4 = -(\alpha_k^2 - 2\sqrt{3}\alpha_k \beta_k - \beta_k^2)(P_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k R_{eq,k}) - (\sqrt{3}\alpha_k^2 + 2\alpha_k \beta_k - \sqrt{3}\beta_k^2)(Q_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k X_{eq,k}) \quad (40)$$

$$f_5 = -(\sqrt{3}\alpha_k^2 - 2\alpha_k \beta_k - \sqrt{3}\beta_k^2)(P_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k R_{eq,k}) - (\alpha_k^2 + 2\sqrt{3}\alpha_k \beta_k - \beta_k^2)(Q_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k X_{eq,k}) \quad (41)$$

$$f_6 = -(\alpha_k^2 + 2\sqrt{3}\alpha_k \beta_k - \beta_k^2)(P_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k R_{eq,k}) + (\sqrt{3}\alpha_k^2 - 2\alpha_k \beta_k - \sqrt{3}\beta_k^2)(Q_{DG,k}^{3\phi} + \gamma_k X_{eq,k}) \quad (42)$$

$$h_1 = \frac{-\alpha_k X_{eq,k} + \beta_k R_{eq,k}}{(\alpha_k^2 + \beta_k^2)(R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2)} \quad (43)$$

$$h_2 = \frac{\alpha_k R_{eq,k} + \beta_k X_{eq,k}}{(\alpha_k^2 + \beta_k^2)(R_{eq,k}^2 + X_{eq,k}^2)} \quad (44)$$

K번째 버스의 부분행렬 B의 0이 아닌 원소들은 삼상 무효전력의 측면에서 수학적식 14 내지 15를 편미분하여 하기와 같은 수학적식 45를 얻을 수 있다.

$$B_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{m,k}^a}{\partial Q_{DG,k}^{3\phi}} & \frac{\partial \Delta I_{r,k}^a}{\partial Q_{DG,k}^{3\phi}} & \frac{\partial \Delta I_{m,k}^b}{\partial Q_{DG,k}^{3\phi}} & \frac{\partial \Delta I_{r,k}^b}{\partial Q_{DG,k}^{3\phi}} & \frac{\partial \Delta I_{m,k}^c}{\partial Q_{DG,k}^{3\phi}} & \frac{\partial \Delta I_{r,k}^c}{\partial Q_{DG,k}^{3\phi}} \end{bmatrix}^t$$

$$= \frac{1}{2(\alpha_k^2 + \beta_k^2)} \begin{bmatrix} 2\alpha_k & -2\beta_k & -\alpha_k + \sqrt{3}\beta_k & \sqrt{3}\alpha_k + \beta_k & -\alpha_k - \sqrt{3}\beta_k & -\sqrt{3}\alpha_k + \beta_k \end{bmatrix}^t \quad (45)$$

마찬가지로 부분행렬 C에 대해서는 하기의 수학적식 46과 같이 표현될 수 있다.

$$C_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta V_k^+}{\partial V_{r,k}^a} & \frac{\partial \Delta V_k^+}{\partial V_{m,k}^a} & \frac{\partial \Delta V_k^+}{\partial V_{r,k}^b} & \frac{\partial \Delta V_k^+}{\partial V_{m,k}^b} & \frac{\partial \Delta V_k^+}{\partial V_{r,k}^c} & \frac{\partial \Delta V_k^+}{\partial V_{m,k}^c} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{6\sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}} \begin{bmatrix} 2\alpha_k & 2\beta_k & -\alpha_k + \sqrt{3}\beta_k & -\sqrt{3}\alpha_k - \beta_k & -\alpha_k - \sqrt{3}\beta_k & \sqrt{3}\alpha_k - \beta_k \end{bmatrix} \quad (46)$$

일반적으로 벡터로 제어되는 분산전원(DG)의 무효전력 한계의 경우는 삼상 무효전력의 결과값이 아닌 q-축의 전류 한계로 나타낼 수 있다.

도 5는 BTCS의 전류 벡터와, DG와 연결된 버스의 전압 벡터를 그래프로 나타낸 도면이다.

앞서 상술한 바와 같이, 전류가 평형상태를 이루는 동안에는 일반적으로 삼상 전압은 평형 상태를 이루지 못한다. 이에 따라, 전압과 전류의 위상각 차이(θ)가 연속적으로 변한다. 조류 계산 과정에 있어서, θ 의 평균 값인 θ_{av} 는 수학적식 47과 같이 표현이 가능하다. 전압의 위상각은 positive-sequence 전압의 위상각을 사용하며 negative와 zero-sequence 의 평균은 0이다.

$$\theta_{av} = \arg(I_{BTCS}^a) - \arg(V_k^+) \quad (47)$$

BTCS의 전류 결과값은 평형 상태에 있기 때문에, 전류 벡터의 크기($|i_{BTCS}|$)는 삼상 전류의 피크값과 같다. 그러므로 d축과 q축에 대하여, i_{BTCS} 는 θ_{av} 로 하기의 수학적식 48 내지 49와 같이 표현된다.

$$i_{BTCS,d} = \sqrt{2} |I_{BTCS}^a| \cos(\theta_{av}) \quad (48)$$

$$i_{BTCS,q} = \sqrt{2} |I_{BTCS}^a| \sin(\theta_{av}) \quad (49)$$

도 5에 도시된 바와 같이, q축의 전류값이 특정값($i_{(q, \text{limit})}$)으로 수렴하게 될 때, 전류 벡터의 한계값($|i_{(BTCS, \text{limit})}|$)과 이로 인한 위상각의 변화(ϕ)는 하기의 수학적식 50 내지 51과 같이 얻어진다.

$$|i_{BTCS, \text{limited}}| = \sqrt{i_{BTCS,d}^2 + i_{q, \text{limit}}^2} \quad (50)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{i_{BTCS,q}}{i_{BTCS,d}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{i_{q, \text{limit}}}{i_{BTCS,d}} \right) \quad (51)$$

이때, 전류는 여전히 평형을 이루고 있기 때문에, 전류 페이지의 위상각의 변화 또한 ϕ 이다. 그러므로 a상에서의 전류 페이지는 하기의 수학적식 52와 같이 나타난다.

$$I_{BTCS, \text{limited}}^a = \frac{|i_{BTCS, \text{limited}}| e^{j(\arg(I_{BTCS}^a) - \phi)}}{\sqrt{2}} \quad (52)$$

수학적식 8 과 수학적식 52를 비교하여, q축의 한계 전류 상태에서 분산전원(DG)의 무효 전력 결과값은 하기의 수학적식 53과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{DG,limited}^{3p} = \text{Im} \left\{ 3 \frac{R_{d,k} - jX_{c,k}}{R_{eq,k} - jX_{eq,k}} V_k^* (I_{BTCS,limited}^a)^* - \frac{|V_k^a|^2 + |V_k^b|^2 + |V_k^c|^2}{R_{eq,k} - jX_{eq,k}} \right\} \quad (53)$$

[0109]

[0110]

만약 전압 제어 모드의 분산전원(DG)의 무효전력이 제한되어 있지 않다면, 분산전원(DG)과 연결된 버스는 PV 버스로 모델링될 수 있다.

[0111]

하지만 q축의 전류가 제한되어 있다면, 버스는 PQ 버스로 모델링되어야 한다. 그러나 이때, 무효 전력의 결과값은 상수가 아니라 수학적 식 53에 의하여 계산된다.

[0112]

PV 버스가 아닌 PQ 버스로 모델링 하는 것은 도 6에 도시된 바와 같이, 수학적 식 49를 통해 계산된 $i_{-}(BTCS,q)$ 와 수학적 식 25를 통해 계산된 V_k^+ 를 통해서 결정된다. 버스의 모델링이 자주 변하게 되는 불안정 상태를 막기 위해서 버스의 모델링은 코드 내에서 2번 이상 반복적으로 변경 조건이 나타나야 변경되도록 한다. 도 5를 살펴보면, q 축의 전류가 양의 값을 갖는다는 것이 음의 무효전력을 낸다는 것을 알 수 있다. 따라서 $i_{-}(q, limit)=i_{-}(q,min)$ 를 만족할 때 분산전원(DG)과 연결된 버스에서 최대의 무효전력을 낼 수 있다. 그러므로 $V_k^+ > 0$ 일 때, 버스는 PV 버스로 모델링이 된다. $i_{-}(q, limit)=i_{-}(q,max)$ 일때는 반대가 성립한다.

[0113]

상술한 조류 계산과정을 간략히 요약하면 다음과 같다.

[0114]

먼저, 도 6에 도시된 바와 같이, 분산전원(DG)과 연결된 버스가 어느 버스로 모델링되는지를 결정한다. 이어서, 수학적 식 53을 이용하여 PQ 버스의 무효전력을 계산한다.

[0115]

이후, 수학적 식 14 내지 15 및 25를 이용하여 전류와 전압이 일치하지 않는 정도를 계산한다.

[0116]

모든 값들의 차의 절대 값이 허용 가능한 정도인지를 계산하여 수렴 여부를 판단하고, 야코비 행렬을 계산한다.

[0117]

이어서, 수학적 식 31을 이용하여 변수들의 값을 변경하고, 다시 분산전원(DG)과 연결된 버스가 어느 버스로 모델링되는지를 결정하는 과정을 재수행한다.

[0118]

또한, Type 1 분산전원(DG)의 경우에는 상기 수학적 식 16 내지 21의 2번째 항을 제거한다.

[0119]

이후, 수학적 식 16 내지 21 및 수학적 식 37 내지 42의 y_k 값을 0으로 한다.

[0120]

이어서, 수학적 식 36의 마지막 두 개의 행렬을 제거하고, 수학적 식 53을 수정한다.

[0121]

이러한 조류 계산 방법의 정확도를 판단하기 위해, MATLAB을 사용하여 사례 연구를 진행하였다. 모든 오차는 1.0×10^{-6} pu 이하이고, 계통의 기저값은 100kVA 이며, 세 개의 분산전원의 종류 중에서 가장 복잡한 Type 3 분산전원(DG)이 사용하였다.

[0122]

본 발명에 따른 조류계산 방법의 정확도는 조류 계산의 결과값과 PSCAD의 모델에서 얻은 결과값을 상호 비교하여 판단할 수 있다.

[0123]

도 7은 분산전원(DG)과 연결된 버스를 680번 버스에 변압기를 통해 연결한 IEEE 13-버스 시스템을 나타낸다. 또한 도 8은 분산전원의 변수 값을 정리한 표이다.

[0124]

도 7 내지 도 8에 도시된 바와 같이, 분산전원(DG)은 -500kVAr에서 600kVAr 사이의 무효전력을 공급할 수 있다. PSCAD 모델에서는 분산전원(DG)이 three-wire two-level VSC using IGBT switches. 스위치 제어 부분에서 SPWN(Sinusoidal Pulse Width Modulation) 방법을 사용하였고, 시뮬레이션은 1μs를 한 스텝으로 진행하였다.

[0125]

본 시뮬레이션에서 분산전원(DG)은 유효전력과 무효전력을 모두 제어할 수 있는데, 역률이 1인 상태에서 5개의 유효전력의 결과(200kW, 400kW, 600kW, 800kW, 1000kW)를 테스트하였다.

[0126]

도 9는 PSCAD에서 측정된 각 상에서의 유효전력과 무효전력의 값을 나타낸 그래프이다.

[0127]

도 9에 도시된 바와 같이, 모든 경우에 유효전력의 결과값이 각 상마다 다른데, 그 이유는 시스템의 모선과 부하의 상태가 평형 상태를 이루지 않기 때문이다. 또한 무효전력이 0이라고 해도, 한 상에서 무효전력을 내면 다른 상에서 무효전력을 소비하는 형태이기 때문이기도 하다. 유효전력값의 차이는 분산전원(DG)의 출력되는 유효전력의 값이 커질수록 커진다. 예를 들어, 유효전력의 값이 1000kW일 때, 유효전력과 무효전력의 상 별 차이는 최대 22.16 kW와 18.81 kVAr이다.

- [0128] 본 발명에 따른 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법의 결과는 PSCAD를 통해 시뮬레이션한 결과값과 거의 일치한다. 두 모델의 전력 결과값의 차는 0.13kVA보다 작다.
- [0129] 도 10은 전압의 크기와 위상각 차이의 최대값을 나타낸 그래프이다.
- [0130] 도 10에 도시된 바와 같이, 전압의 크기와 위상각의 차이의 최대값은 각각 2.0×10^{-5} pu(0.002%), 0.023도 이다.
- [0131] 모든 경우에 조류 계산은 5 번의 반복 연산 안에 수렴하였다. 이러한 반복 연산 횟수는 원래의 시스템에 요구되는 연산의 횟수와 동일하다. 즉, 분산전원(DG)을 포함하는 것은 반복 연산의 횟수에는 영향을 미치지 않는 것을 뜻한다.
- [0132] 도 11은 PSCAD 모델과 분산전압을 이용한 조류 계산을 비교한 그래프이다.
- [0133] 도 11에 도시된 바와 같이, 한 상의 전압과 위상각의 차이의 최대값은 각각 2.7×10^{-3} pu(0.27%)와 0.112도 이다.
- [0134] 도 12에 도시된 간단한 분산전원(DG) 모델을 이용한 경우에는 a, c상의 경우 PSCAD에 비해 큰 값이 나왔는데, b상의 경우 반대로 작게 나왔다. 이러한 점들을 고려해 볼 때 본 발명에 따른 조류계산 방법이 평형을 이루지 않은 상태에서 더 정확한 결과를 낸다는 것을 알 수 있다.
- [0135] 본 시뮬레이션에서 분산전원(DG)은 무효 전력의 출력값보다 681번 버스의 정상 전압을 제어한다. 분산전원(DG)의 삼상 유효 전력은 400kW로 설정되어 있고, 각 상마다 각각 다른 전압 기준(0.98pu, 1.01pu, 1.04pu)을 적용하였다.
- [0136] 도 13은 PSCAD 모델을 기준전압과 정상전압 및 각 상의 전압을 측정한 값을 나타낸 그래프이다.
- [0137] 도 13에 도시된 바와 같이, 동작 상태가 평형을 이루지 않기 때문에, 각 상의 전압의 크기는 눈에 띄게 다르다. 두 번째 경우(기준 전압 = 1.01pu)에는 분산 전원(DG)이 681번 버스의 전압을 기준 전압 내에서 제어할 수 있는데 반하여, 다른 두 경우에는 q축의 전류 한계 때문에, 전압을 기준 전압 내로 제어할 수 없었다. 첫 번째 경우(기준 전압 = 0.98pu)에는 q축의 전류가 상한 한계에 달하여 삼상의 무효 전력은 -497kVAr, 정상 전압은 0.991pu로 나왔다. 반대로 세 번째 경우(기준 전압 = 1.04pu)에는 q축의 전류가 하한 한계에 달하여 삼상의 무효전력은 626kVAr, 정상 전압은 1.036pu로 나왔다.
- [0138] 본 발명에 따른 조류 계산 결과는 PSCAD 모델의 시뮬레이션 결과와 거의 일치한다. 두 방법에 따른 삼상 무효 전력의 차이 최대 값은 0.25kVAr로 무효 전력 한계의 0.05%에 해당한다. 또한 전압 크기의 차이 또한 매우 작다.
- [0139] 도 13(b)에 도시된 바와 같이, 두 방법의 전압 크기 차이는 최대 3.0×10^{-5} pu이다. 첫 번째 경우에는 6번의 반복 연산을 수행하였으며, 나머지 경우에는 5번의 반복연산을 수행하였다.
- [0140] 또한 본 발명에 따른 조류계산 방법에서 분산전원(DG)의 개수가 수렴 속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 IEEE 123-버스 시험 시스템을 사용하였다. 분산전원(DG)의 개수를 버스에 하나씩 추가하면서 조류계산을 반복적으로 풀어봄으로써 반복 연산의 횟수를 측정하였다. 분산전원(DG)이 버스에 연결될 때 150kVA 4.16/0.69kV 변압기와 60kW의 발전기를 통한다고 가정하였다.
- [0141] 이때, 분산전원(DG)의 주요 변수들은 도 14에 정리되어 있다. 동작 모드와 전류 한계가 수렴 속도에 미치는 영향을 분석하기 위해, 아래와 같은 세 가지 경우를 시뮬레이션 한다.
- [0142] 경우 1: 모든 분산전원(DG)은 무효 전력을 제어하는 모드로 동작한다. 무효 전력의 레퍼런스 값은 0kVar이다. 분산전원(DG)과 연결된 버스는 PQ버스로 모델링되었다.
- [0143] 경우 2: 모든 분산전원(DG)의 전압을 제어하는 모드로 동작한다. 레퍼런스 전압의 값은 1.03pu이다. q축의 전류 한계는 적용 되지 않는다. 그러므로 DG와 연결된 버스는 항상 PV 버스로 모델링 된다.
- [0144] 경우 3: 동작 모드와 레퍼런스 전압의 값은 2번 경우와 같다. 하지만 q 축의 전류한계가 포함된다. 따라서 q축의 전류와 전압의 오차에 의해 PV버스나 PQ버스로 모델링될 수 있다.
- [0145] 도 15는 분산전원의 개수에 따른 세 경우의 반복 연산 횟수를 나타낸 그래프이다.
- [0146] 도 15에 도시된 바와 같이, 1번과 2번 경우에는 전류의 한계가 없기 때문에, 분산전원(DG)의 개수와 상관없이 최대 6번의 반복 연산 안에 수렴하게 된다. 예를 들어, 62개의 DG가 추가되더라도 단 한번의 반복 연산만 더해

진다는 뜻이다. 3번 경우에는 평균 반복연산의 횟수는 7.8회이다. 그리고 최대 반복 연산의 횟수는 51개의 DG가 연결 되었을 때로 11회이다.

[0147] 이러한 경우, 도 16에 도시된 바와 같이, 3번 경우에서도 분산전원(DG)의 개수가 많은 경우에 크게 수렴 속도가 떨어지지 않는다는 것을 알 수 있다.

[0148] 또한, 이러한 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템은 컴퓨터로 실행하기 위한 프로그램이 기록된 컴퓨터 판독가능 기록매체에 저장될 수 있다. 이때, 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록매체는 컴퓨터 시스템에 의하여 읽혀질 수 있는 데이터가 저장되는 모든 종류의 기록 장치를 포함한다. 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록 장치의 예로는 ROM, RAM, CD-ROM, DVD±ROM, DVD-RAM, 자기 테이프, 플로피 디스크, 하드 디스크(hard disk), 광데이터 저장장치 등이 있다. 또한, 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록매체는 네트워크로 연결된 컴퓨터 장치에 분산되어 분산방식으로 컴퓨터가 읽을 수 있는 코드가 저장되고 실행될 수 있다.

[0149] 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템은 배전계통의 분산전원이 연계된 지점에서 전압 및 전류 전력의 분포를 정확하게 판단할 수 있어, 분산전원이 연계된 배전계통을 안정화시킬 수 있는 효과가 있다.

[0150] 또한 본 발명의 분산전원 연계에 따른 배전계통의 조류 계산 방법 및 시스템은 배전계통의 불균형 동작조건에서도 분산전원의 상이 달라지는 것을 방지할 수 있는 효과가 있다.

[0151] 상기에서는 본 발명의 바람직한 실시 예에 대하여 설명하였지만, 본 발명은 이에 한정되는 것이 아니고 본 발명의 기술 사상 범위 내에서 여러 가지로 변형하여 실시하는 것이 가능하고 이 또한 첨부된 특허청구범위에 속하는 것은 당연하다.

부호의 설명

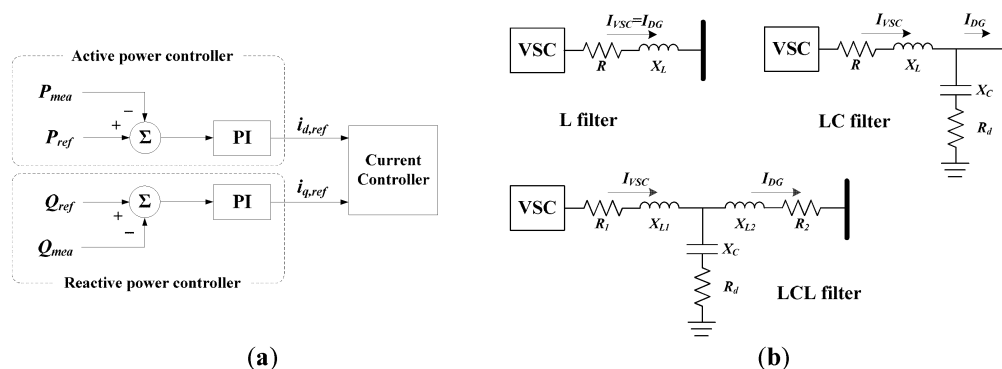
[0152] 120: 분산전원모델링부 140: 상전류계산부
160: 조류계산부

도면

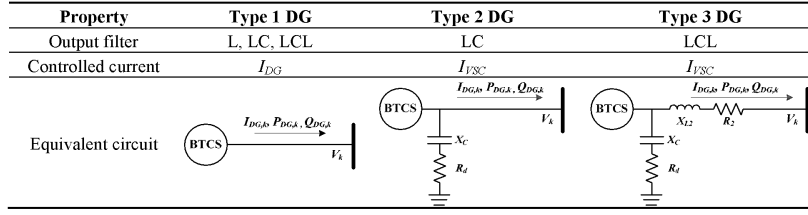
도면1



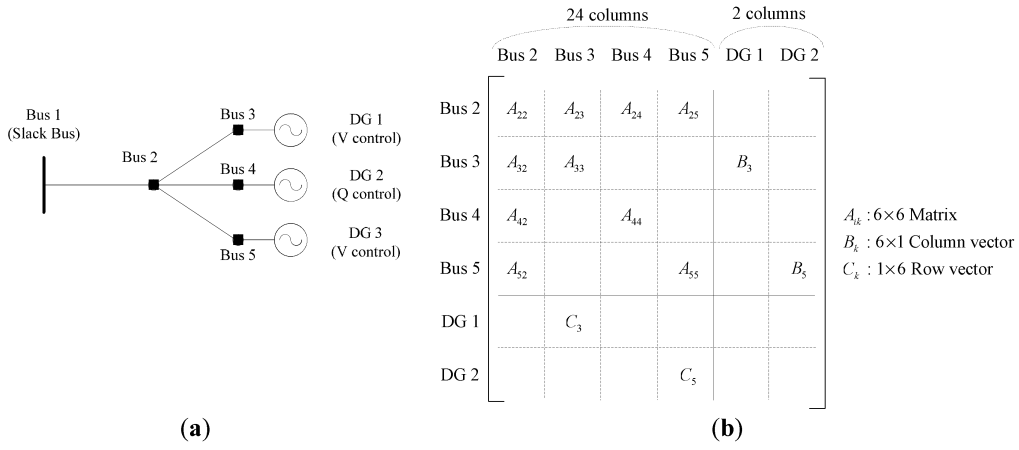
도면2



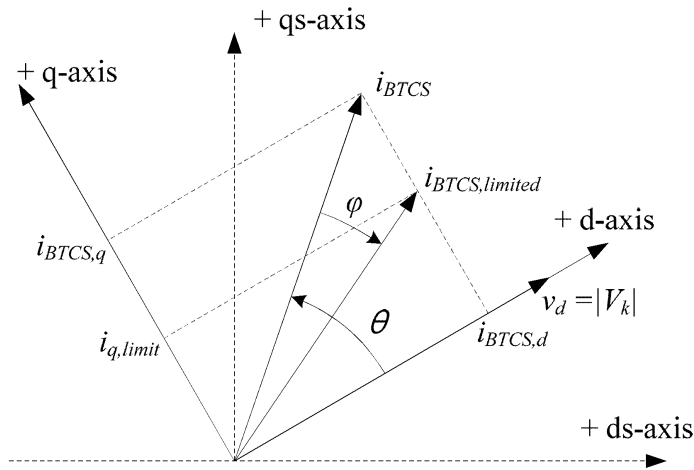
도면3



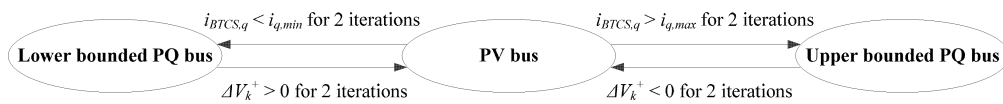
도면4



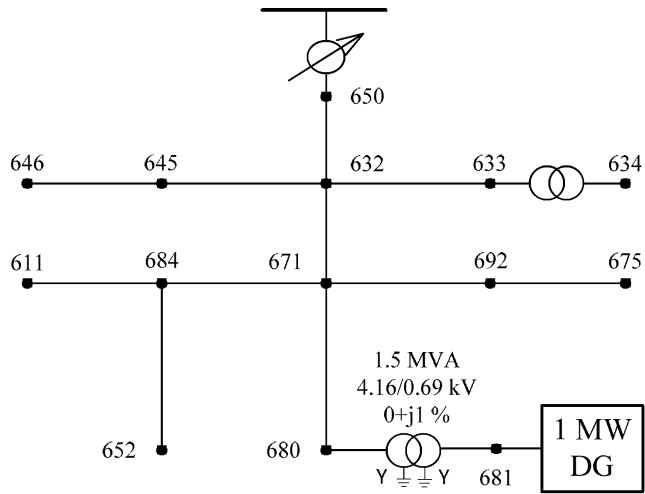
도면5



도면6



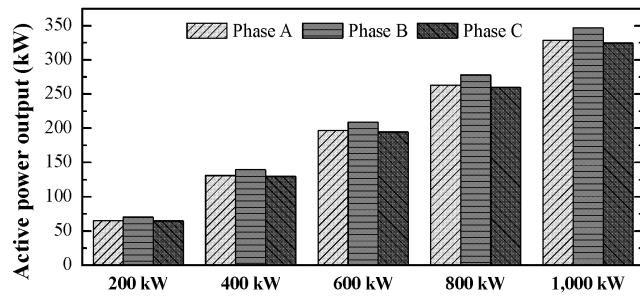
도면7



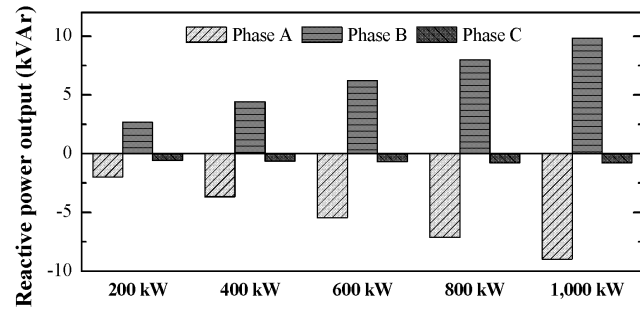
도면8

Property	Value	Unit
Maximum q -axis current, $i_{q,max}$	650	A
Minimum q -axis current, $i_{q,min}$	-650	A
System frequency, f_{sys}	60	Hz
Switching frequency, f_{sw}	10	kHz
Converter side inductance, L_1	0.25	mH
Grid side inductance, L_2	0.11	mH
Capacitance, C	279	μ F
Damping resistance, R_d	0.17	Ω

도면9

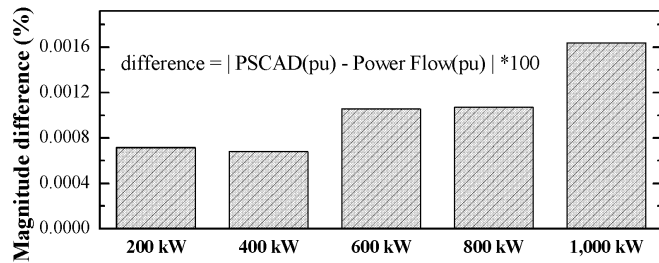


(a)

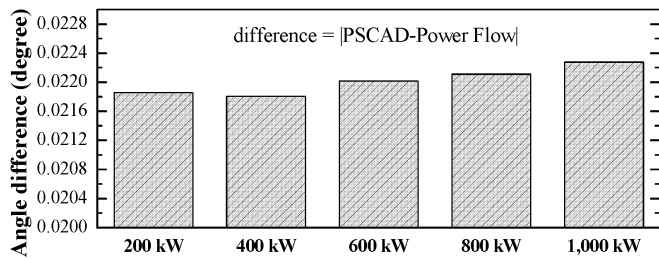


(b)

도면10

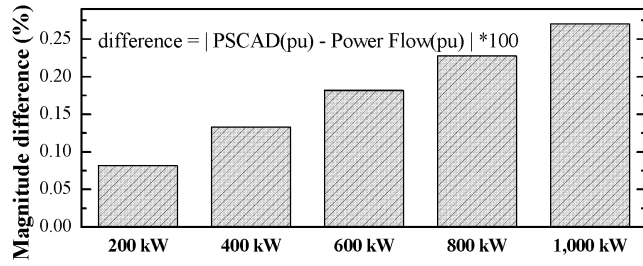


(a)

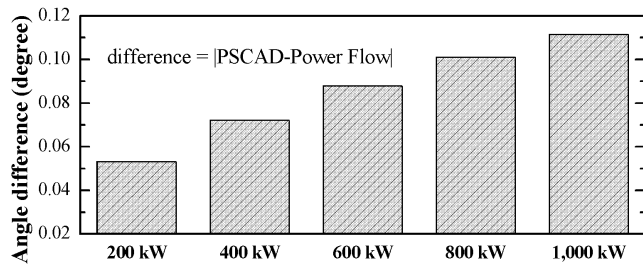


(b)

도면11

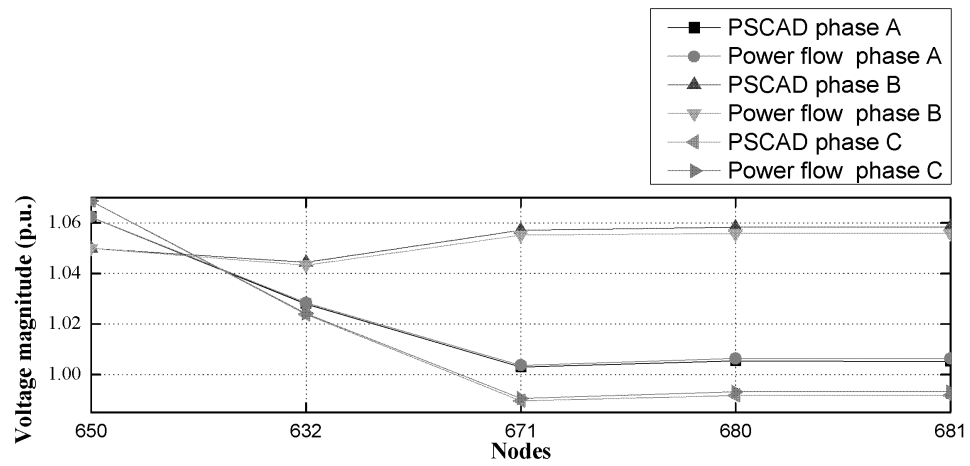


(a)

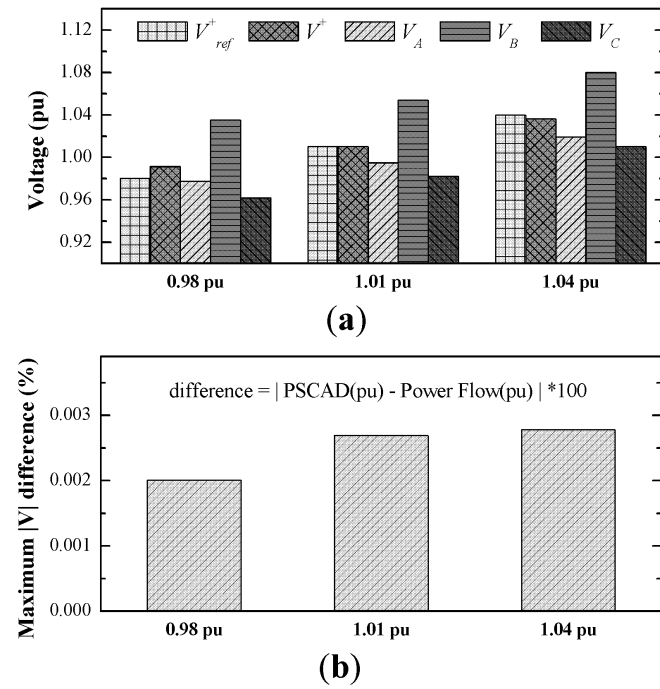


(b)

도면12



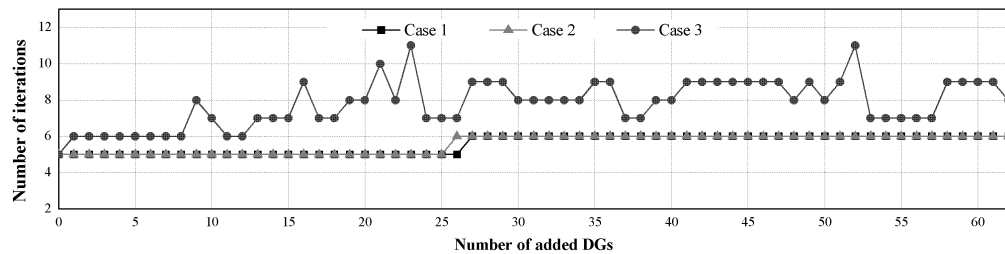
도면13



도면14

Property	Value	Unit
AC voltage, V_{ac}	690	V
Maximum q -axis current, $i_{q,max}$	100	A
Minimum q -axis current, $i_{q,min}$	-100	A
Grid side inductance, L_2	0.3	mH
Capacitance, C	27.8	μ F
Damping resistance, R_d	0.9	Ω

도면15



도면16

