NOVA

Power/Energy Track

분산전원이 연계된 송배전 전력시스템의 고장전류 계산 기법에 관한 연구

The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 71, No. 3, pp. 469–476, 2022

NOVA

Contents

01 **Introduction**

고장해석의 필요성 , 분산전원 도입, 연구목적

02 **Fault Analysis Method**

변화된 전력시스템, 대칭좌표법, Zbus building

03 **Distributed Generation Modeling**

전압원 해석, 전류원 해석

04 **Fault Current Calculation & Results**

전류 주입법, 사례연구, 고장전류 계산결과

05 **Conclusion**

연구 결과 요약, 한계 및 향후 연구

NOVA

Power/Energy Track

Introduction

고장해석의 필요성 , 분산전원 도입, 연구목적

01

01 고장해석

사고 발생 시 전압,전류를 계산하여 보호기기의 적정성을 판단한다.

01
고장 발생

▶

02
전류 변화

▶

03
고장전류 계산

▶

04
보호 적정성 검토

사고가 발생하면 얼마나 큰 전류가 어디로 흐르는지 계산

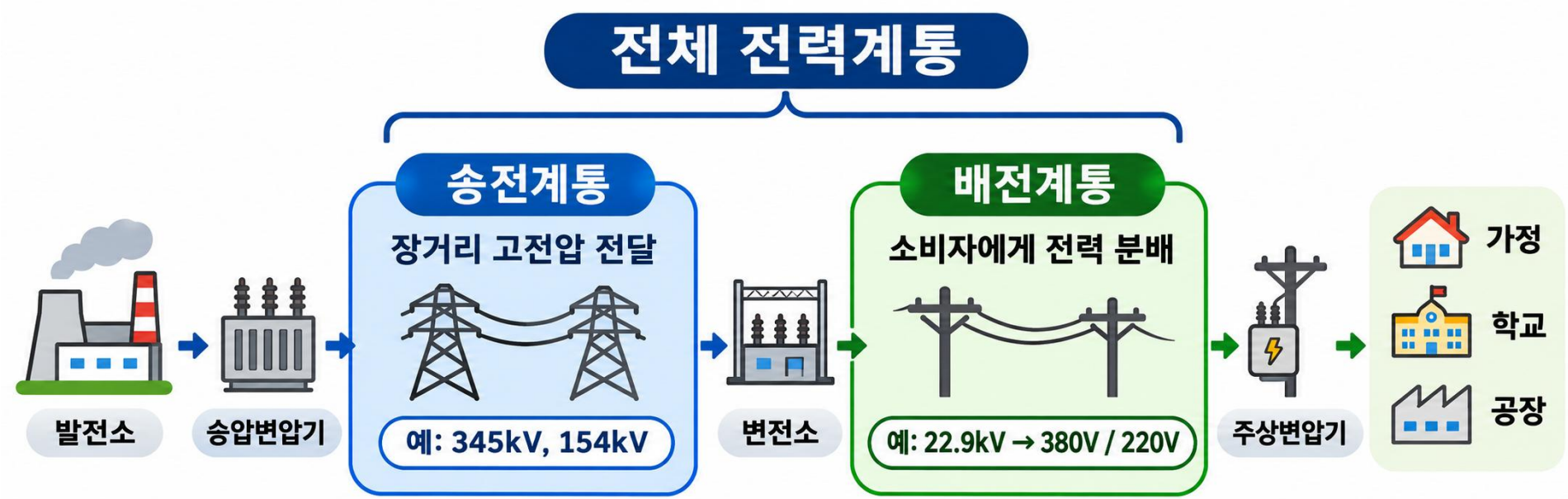
01 송전계통, 배전계통

송전계통 (Transmission)

대규모 전력을 장거리 전달 · 폐회로를 포함한 복잡한 구조

배전계통 (Distribution)

변전소 전력을 소비자에게 분배 · 전통적으로 방사상 구조



01 분산전원

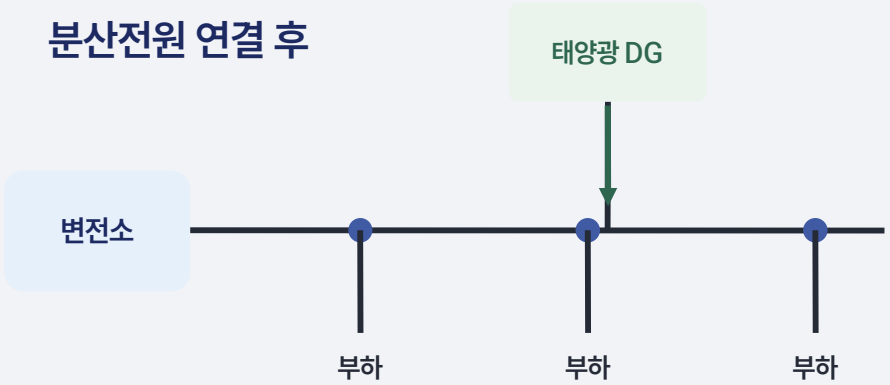
분산전원(Distributed Generation)

분산전원(Distributed Generation)은 대규모 발전소와 달리 전력 소비지 근처나 배전계통의 여러 위치에 분산되어 설치되는 발전원이다.대표적으로 태양광, 풍력, 연료전지 등이 있으며, 전력계통에 직접 전력을 공급하는 역할을 한다.

기존 배전계통



분산전원 연결 후



분산전원도 고장전류 공급원이 될 수 있어 더 정확한 계산이 필요하다

NOVA

Power/Energy Track

Fault Analysis Method

변화된 전력시스템, 대칭좌표법, Zbus building

02

01 변화된 전력시스템 : 고려해야할 4가지

가 **변압기 위상변화**

2·3권선 변압기의 위상차 반영

나 **부하의 영향**

고장 전 모선전압 및 부하 효과 반영

다 **전압원 DG 해석**

테브낭 등가 전압원 모델

라 **전류원 DG 해석**

전류 제한·주입 특성 반영

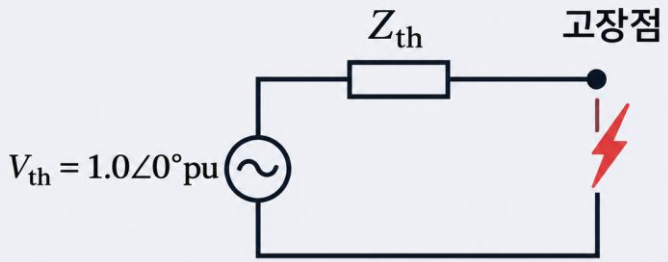
01 가. 부하를 무시하지 않는 고장해석

Δ-Y / Y-Δ 결선

변압기 결선에 따라 정상분에 ±30°의 위상변화가 생길 수 있음 (방향은 결선과 기준에 따라 결정)

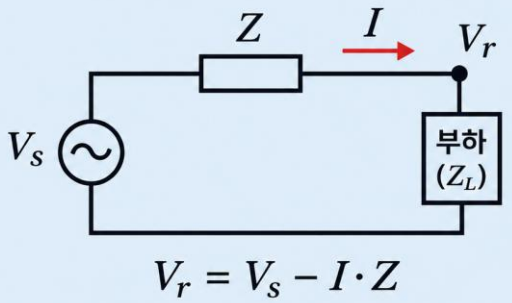
01 가. 변압기의 위상변화를 고려

기존



- 테브난 등가회로 전압
  $V_{th} = 1.0\angle 0°$ pu (역률각 0°)
- 부하 무시
- 해당 조건으로 고장전류 계산

정확한 고장전류 계산

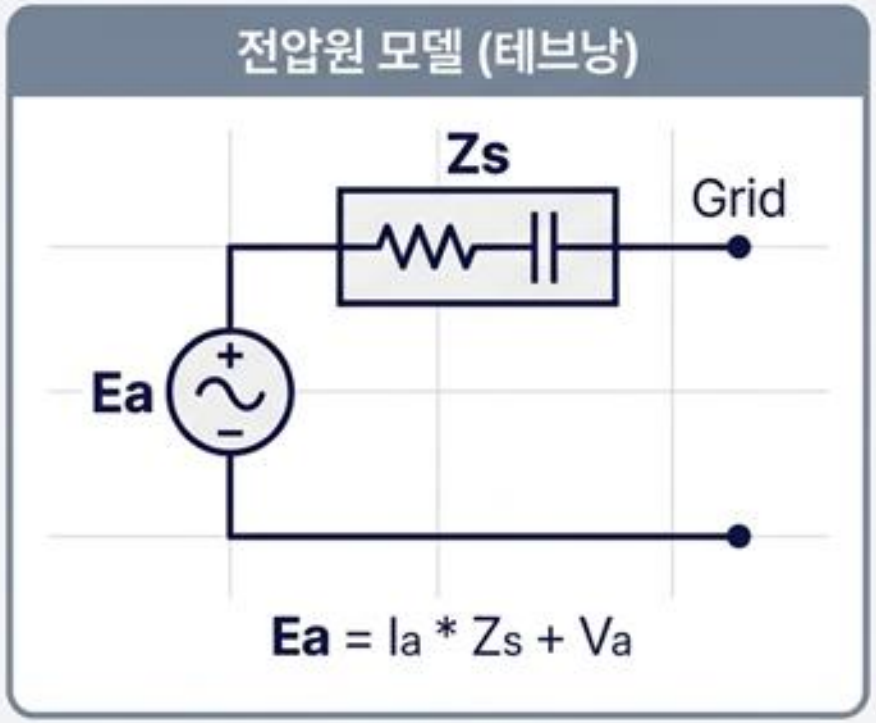


$$V_r = V_s - I \cdot Z$$

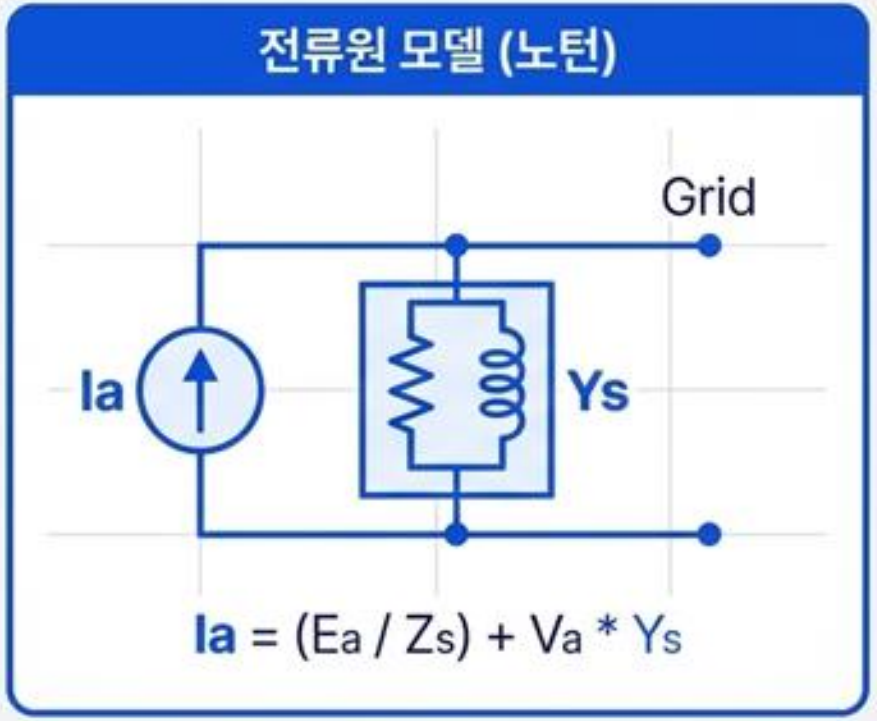
- 부하를 고려한 해석
- 선로 임피던스와 부하전류 때문에 전압강하 발생
- 따라서 $V_r = V_s - I \cdot Z$
- 고장 전 부하 상태를 반영해야 함

01 다,라. 분산전원의 전압원/전류원 해석

전압원 모델



전류원 모델



일반적인 동기발전기는 전압원으로 모델링하지만, 인버터 연계형 분산전원은 전류원으로 모델링할 수 있다.

01 Zbus

복잡한 계통의 고장전류 계산을 위한 모선 임피던스 행렬

$$I = Ybus\ V$$

어드미턴스 행렬

$$V = Zbus\ I$$

임피던스 행렬

$$Zbus = Ybus^{-1}$$

대규모 계통에서 전체 역행렬 계산은 부담이 될 수 있음

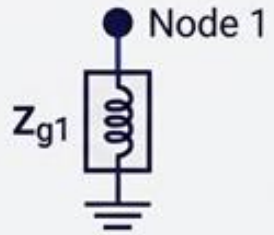
▼

기존 Zbus Building 규칙으로 선로 추가에 따라 행렬을 직접 갱신

01 Zbus

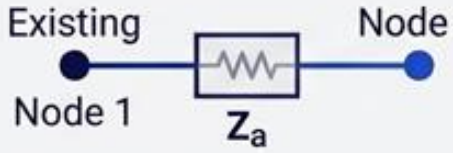
기존 Zbus Building 규칙으로 선로 추가에 따라 행렬을 직접 갱신

1 새로운 모선을 기준(대지)에 연결



$$Z(1) = [Z_{g1}]$$

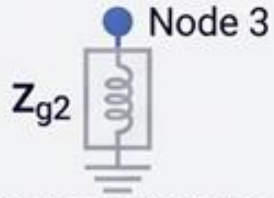
2 새로운 모선을 기존 모선에 연결



행과 열이 확장되며, 기존 행렬에 Z_a가 더해짐.

$$Z_{new} = Z_{old} + Z_a$$

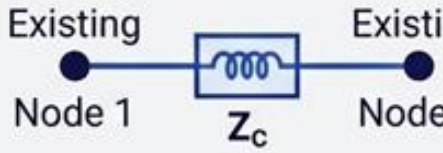
3 기존 모선을 기준(대지)에 연결 (Kron Reduction)



크론 리덕션을 통해 차원을 축소.

$$Z(new)_{bus} = Z_{old} - \frac{Z_{col} * Z_{row}}{Z_{ii} + Z_{g2}}$$

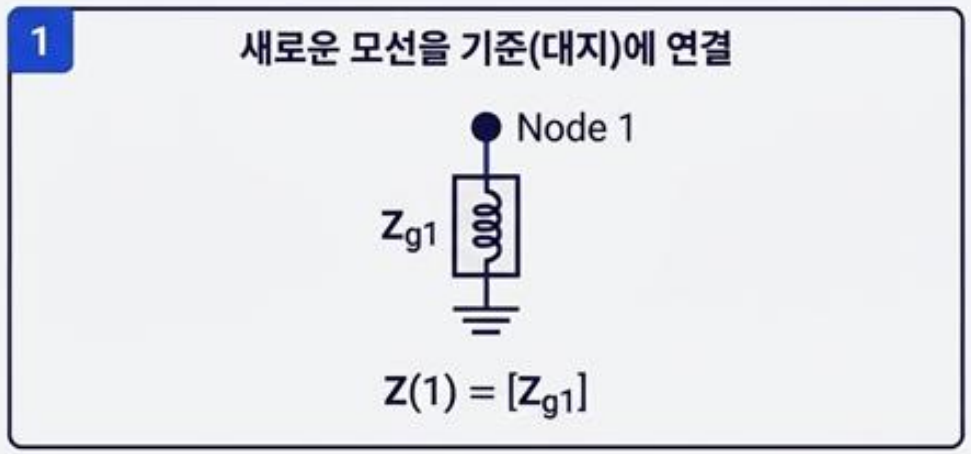
4 두 개의 기존 모선을 서로 연결



$\gamma = (Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij})^{-1}$ 계수를 사용하여 차원 축소 완료.

01 Zbus

Zbus bulding STEP1 – 새로운 모선을 기준모선에 연결



Zbus = [Zg1]

Zg1 = j0.01 p.u.

1개 모선 → 1 × 1 행렬

01 Zbus

Zbus bulding STEP1 – 새로운 모선을 기준모선에 연결



기준모선 (접지)

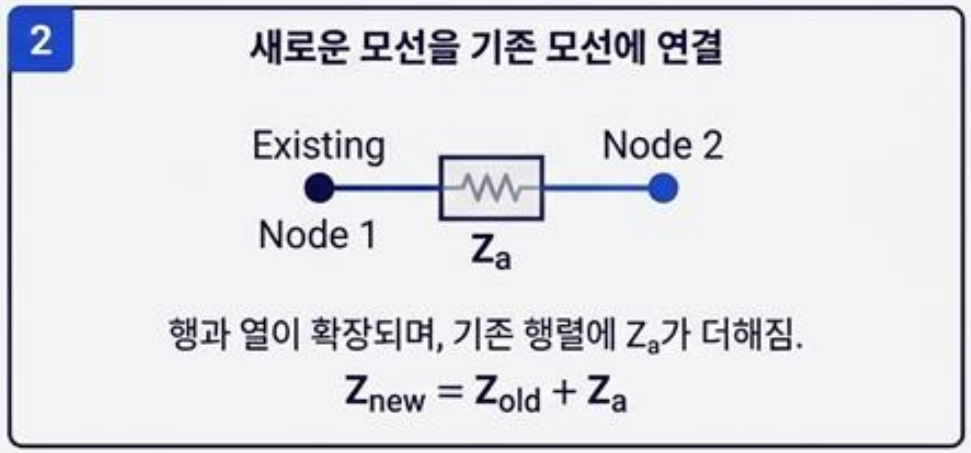
Zbus = [Zg1]

Zg1 = j0.01 p.u.

1개 모선 → 1 × 1 행렬

01 Zbus

Zbus bulding STEP2 – 새로운 모선을 기존모선에 연결



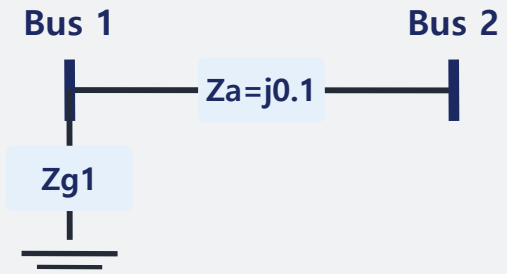
$$\begin{bmatrix} j0.01 & j0.01 \\ j0.01 & j0.11 \end{bmatrix}$$

Z22 = Z11 + Za = j0.11

비대각성분은 두 모선이 공유하는 경로의 임피던스 관계를 반영

01 Zbus

Zbus bulding STEP2 – 새로운 모선을 기존모선에 연결



Step 2: Bus 2 추가 (Za=j0.1)

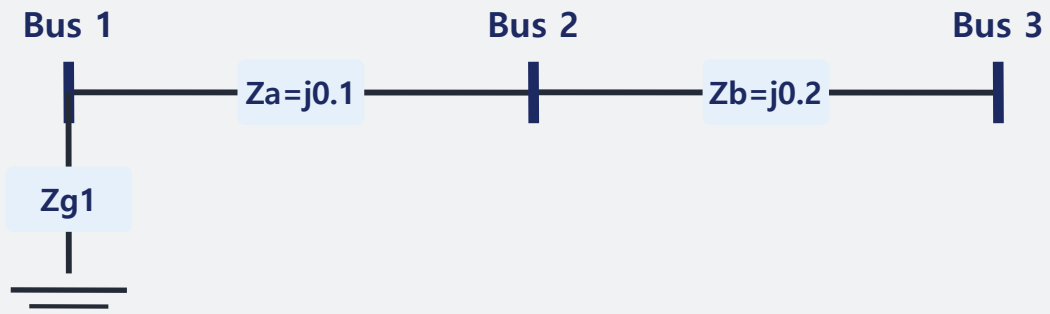
$$\begin{bmatrix} j0.01 & j0.01 \\ j0.01 & j0.11 \end{bmatrix}$$

Z22 = Z11 + Za = j0.11

비대각성분은 두 모선이 공유하는 경로의 임피던스 관계를 반영

01 Zbus

Zbus bulding STEP2 – 새로운 모선을 기존모선에 연결



Bus 2에 Zb=j0.2를 통해 Bus 3 연결

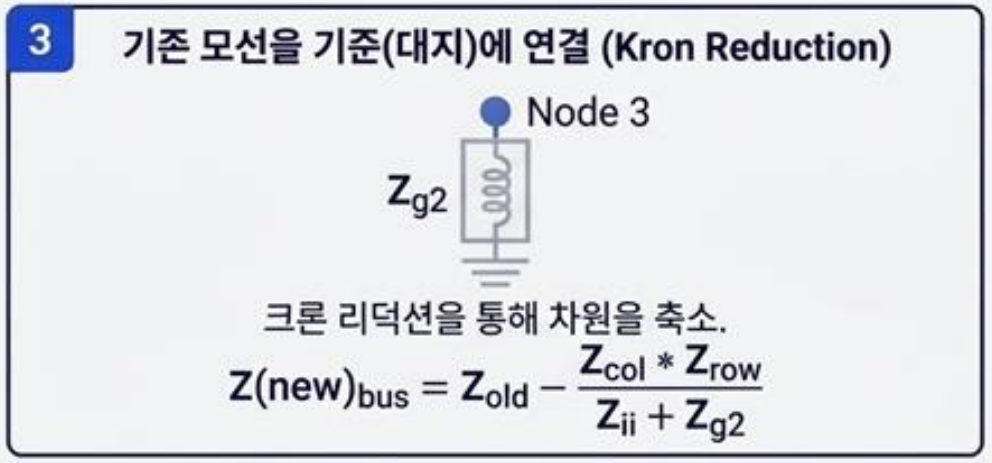
$$\begin{bmatrix} j0.01 & j0.01 & j0.01 \\ j0.01 & j0.11 & j0.11 \\ j0.01 & j0.11 & j0.31 \end{bmatrix}$$

Z33 = Z22 + Zb = j0.31

비대각성분은 두 모선이 공유하는 경로의 임피던스 관계를 반영

01 Zbus

Zbus bulding STEP3 – 기존모선을 기준모선에 연결

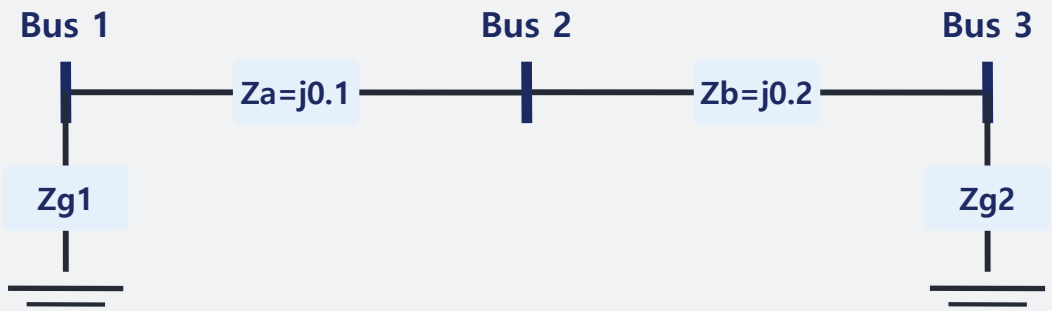


$$Zbus(4) \approx j \times$$
$$[0.009688 \;\; 0.006563 \;\; 0.000313]$$
$$[0.006563 \;\; 0.072188 \;\; 0.003438]$$
$$[0.000313 \;\; 0.003438 \;\; 0.009688]$$

크론 리덕션을 이용해 기존 Zbus의 성분들을 갱신

01 Zbus

Zbus bulding STEP3 – 기존모선을 기준모선에 연결



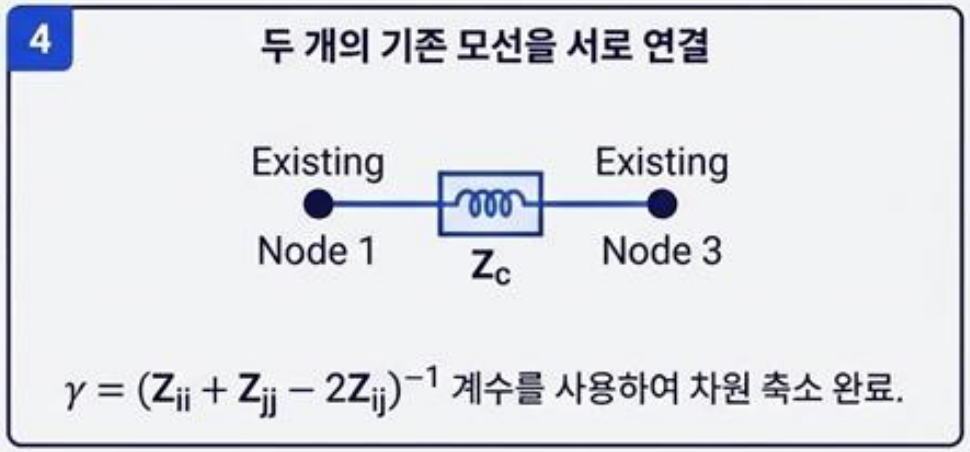
Bus 3도 기준모선에 Zg2=j0.01로 연결

$$Zbus(4) \approx j \times \begin{bmatrix} 0.009688 & 0.006563 & 0.000313 \\ 0.006563 & 0.072188 & 0.003438 \\ 0.000313 & 0.003438 & 0.009688 \end{bmatrix}$$

크론 리덕션을 이용해 기존 Zbus의 성분들을 갱신

01 Zbus

Zbus bulding STEP4 – 이미 존재하는 두 모선을 새로운 선로로 연결

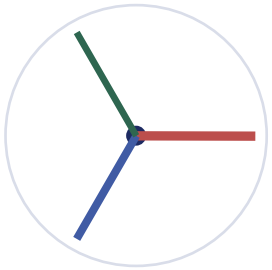


$$\begin{bmatrix} j0.01 & j0.01 & j0.01 \\ j0.01 & j0.11 & j0.11 \\ j0.01 & j0.11 & j0.31 \end{bmatrix}$$

Z33 = Z22 + Zb = j0.31

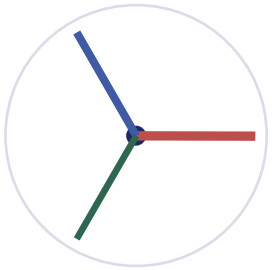
크론 리덕션을 이용해 기존 Zbus의 성분들을 갱신

01 대칭좌표법: 불평형 3상 해석의 기초



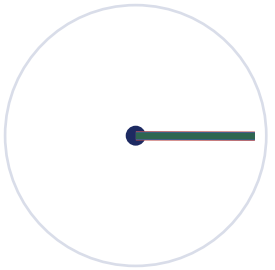
정상분 V_1

a-b-c 상순서



역상분 V_2

a-c-b 상순서



영상분 V_0

세 상 같은 위상

$$Va = V_0 + V_1 + V_2$$

b·c상에는 위상회전 연산자 $a = 1\angle 120°$ 사용

NOVA

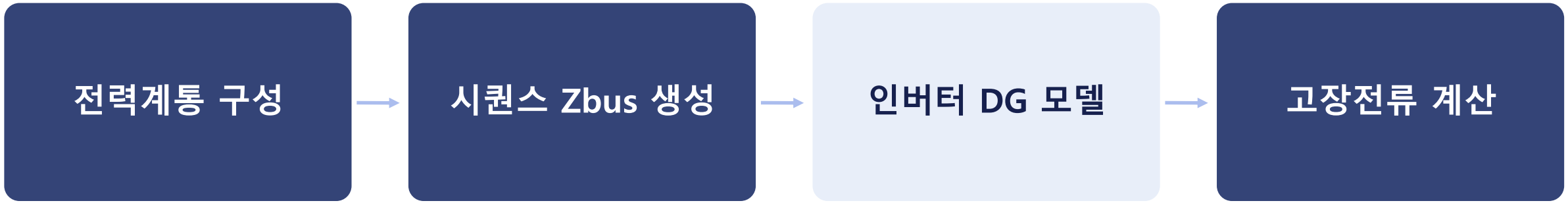
Power/Energy Track

Distributed Generation Modeling

전압원 해석, 전류원 해석

03

01 고장전류 계산



이제 분산전원을 전류원으로 취급할 때의 고장전류 기여를 계산한다.

01 전압원 해석 : 테브난 모델

$$Ea = Ia\,Zs + Va$$

Ea: 내부 등가전압

Va: 단자전압

Zs: 내부 임피던스

Ia: 계통으로 출력되는 전류

전압원 모델은 기존 고장해석의 테브낭 등가회로를 활용할 수 있음

01 전류원 해석: 노턴 모델

$$I_s = I_a + Y_s V_a$$

I_s: 노턴 등가전류

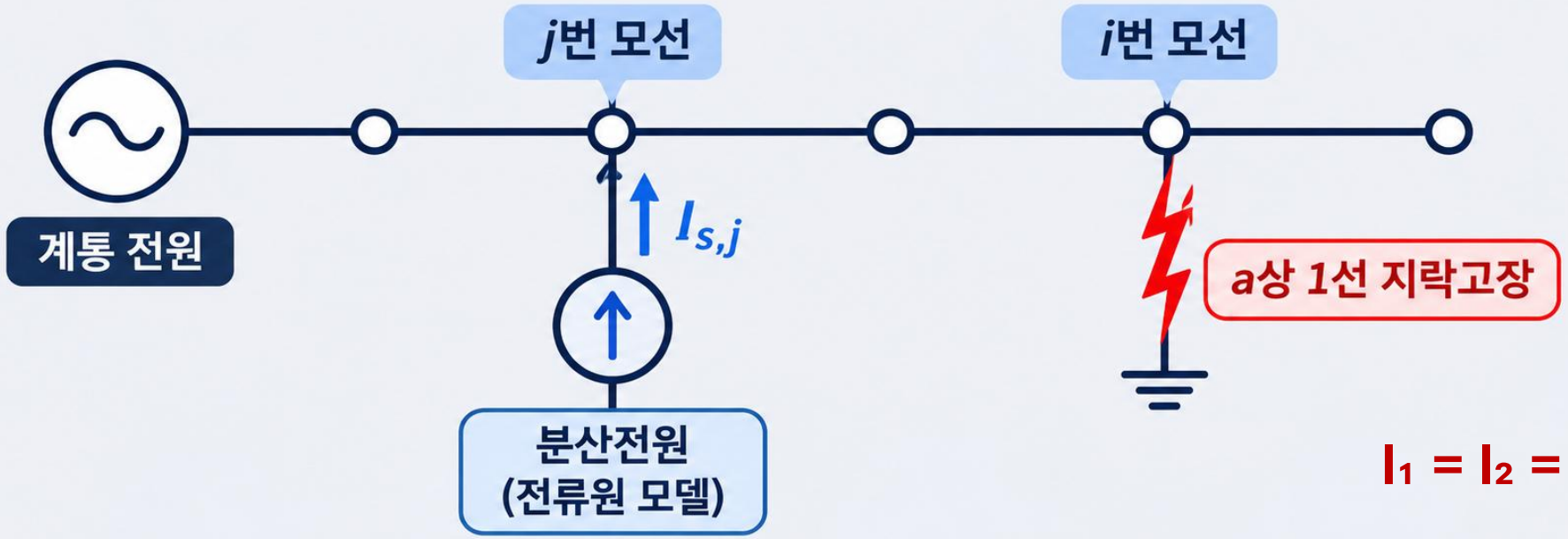
$Y_s = 1 / Z_s$: 병렬 어드미턴스

V_a: 단자전압

I_a: 실제 계통 측 출력전류

전류원 형태를 사용하면 인버터의 주입 전류를 고장해석에 반영 가능

01 전류 주입법

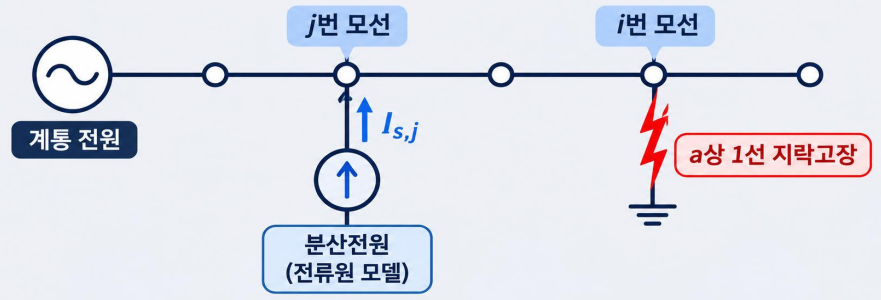


$I_1 = I_2 = I_0$ (1선 지락 고장점)

전류 주입법: j번 모선의 분산전원이 전류를 주입하고, i번 모선에서 고장을 해석

01 정상분 전류 주입 행렬

$$I_1 = [0 \ \dots \ I_{s,j} \ \dots \ 0]^T$$



전류 주입법: *j*번 모선의 분산전원이 전류를 주입하고, *i*번 모선에서 고장을 해석

j번 모선 위치에만 전류원 Is, j가 들어간다.

논문 식 (11): $V_1 = -Z_{bus,1} I_1$

01 정상분에서 고장전류 성분 계산

$$I_{i,1} = V_{i,1} / Z_{bus,1,ii}$$

$I_{i,1}$	고장모선 i의 정상분 전류
$V_{i,1}$	고장모선 i의 정상분 전압
$Z_{bus,1,ii}$	정상분 임피던스 행렬의 i번째 대각성분

1선 지락: $I_{i,1} = I_{i,2} = I_{i,0}$

01 정상분에서 고장전류 성분 계산

역상분

$$I_2 = [0 \cdots I_{i,2} \cdots 0]^T$$

$$\mathbf{V_2 = -Z_{bus,2} I_2}$$

영상분

$$I_0 = [0 \cdots I_{i,0} \cdots 0]^T$$

$$\mathbf{V_0 = -Z_{bus,0} I_0}$$

$$\mathbf{[V_a\ V_b\ V_c]^T = T \cdot [V_0\ V_1\ V_2]^T}$$

01 고장의 종류별 고장전류 계산방법

1선 지락	$Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Zf$
선간단락	$Z_1 + Z_2 + Zf$
선간지락	$Z_1 + (Z_2 \parallel (Z_0 + 3Zf))$
3상단락	$Z_1 + Zf$

고장전류의 정확한 계산에는 고장 종류별 시퀀스 접속을 반영

Fault Current Calculation & Results

전류 주입법, 사례연구, 고장전류 계산결과

04

01 사례연구 : 분산전원이 연결된 계통

변전소 발전기
Slack
→
주변압기
Δ−Y
→
송배전선로
ACSR
→
변압기
Y−Δ
→
분산전원
DG

기준용량 100 MVA · 1선 지락 고장 · 변압기 위상변화 반영

01 사례연구 결과 :전압원 모델

$$If = 1.4489\angle -47.04^\circ \text{ p.u.}$$

$$= 3{,}652.94\angle -47.04^\circ \text{ A}$$

상전압 분석

고장점 A상 전압이 0 p.u.로 계산됨

변압기 위상변화

정상분·역상분의 위상변화를 비교

01 결론

핵심: 인버터 연계형 분산전원의 전류원 특성을 고장해석에 반영해야 한다

NOVA

Thank you

Questions & Discussion