

[송배전설비 기술위원회 세미나]

배전계통 SVR 운영기술 개발현황

2024.04.25.
전남대학교 전기공학과
안 선 주



CHONNAM
NATIONAL UNIVERSITY

0 목차

- I 분산전원 연계와 배전계통 전압조정
- II 선로 전압 조정기(SVR)의 기본 원리
- III 역조류에 의한 SVR 제어 실패 - 새로운 운전 모드
- IV 분산전원을 고려한 SVR 제어 파라미터 설정
- V 결론 및 제언

1 배전계통 분산전원 연계 현황 및 문제

- 한전의 신재생 발전원 중 75%(용량 기준)가 배전계통에 연계

〈전력망 별 분산에너지 접속현황('23년말)〉

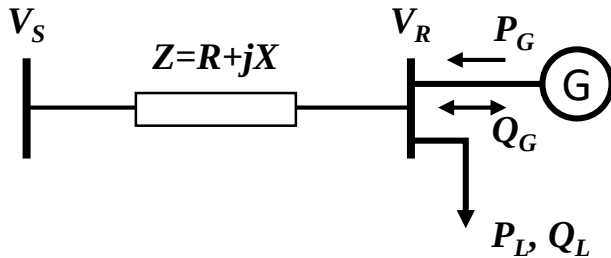
구분	송전망	배전망	합계
접속(건)	720(0.01%)	905,710(99.9%)	906,430(100%)
용량 (GW)	8.2(25%)	25.5(75%)	33.8(100%)

[자료 : 한전 배전계획처]

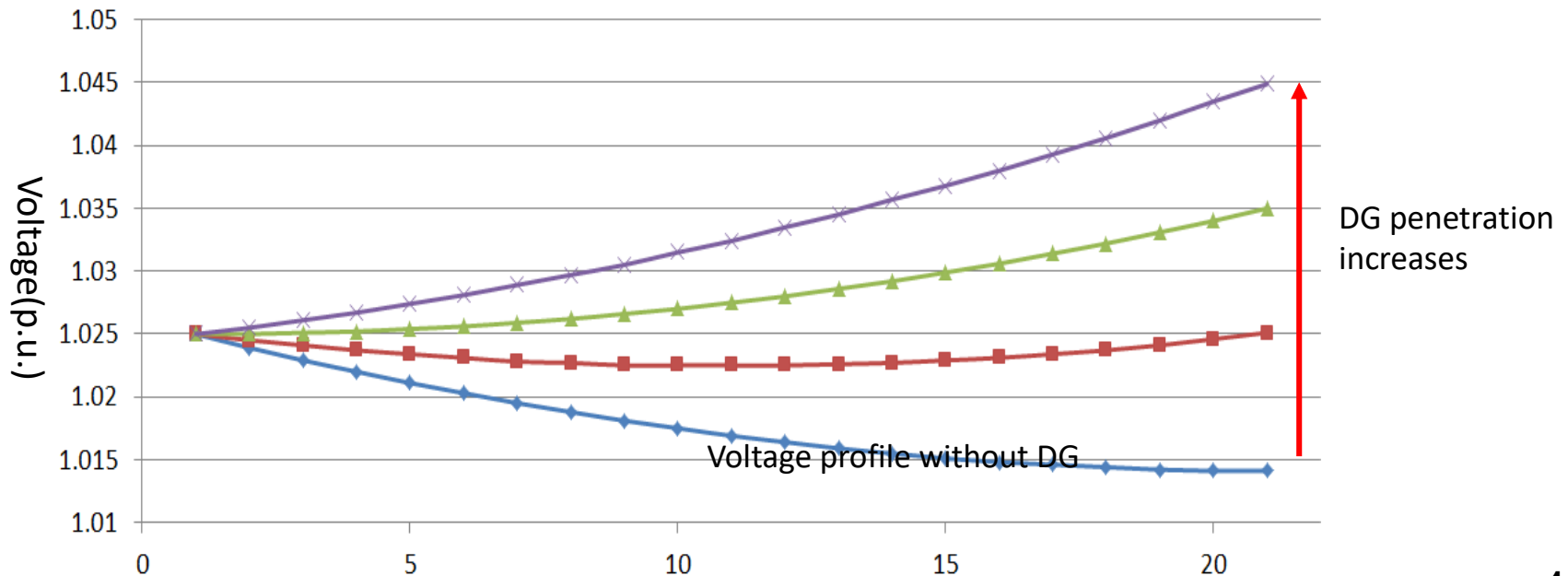
- 분산전원 연계의 배전계통 이슈
 - 전압 : 수용가 및 계통 설비의 상시 및 순시 전압 변동
 - 보호/안전 : 고장 전류 특성 변화, 역조류, 보호협조 실패, 인적 피해
 - 과부하 : 선로 과부하, 순부하 변동, 상 불평형 증가
 - 전압 제어기기의 제어 횟수 증가 : 기기 수명 단축
 - 전력 품질 : 전압 품질 문제, 고조파 문제 등

2 분산전원으로 인한 전압 상승(과전압)

- 분산전원의 출력이 부하를 초과하는 경우 역조류 발생 및 이로 인한 전압 상승

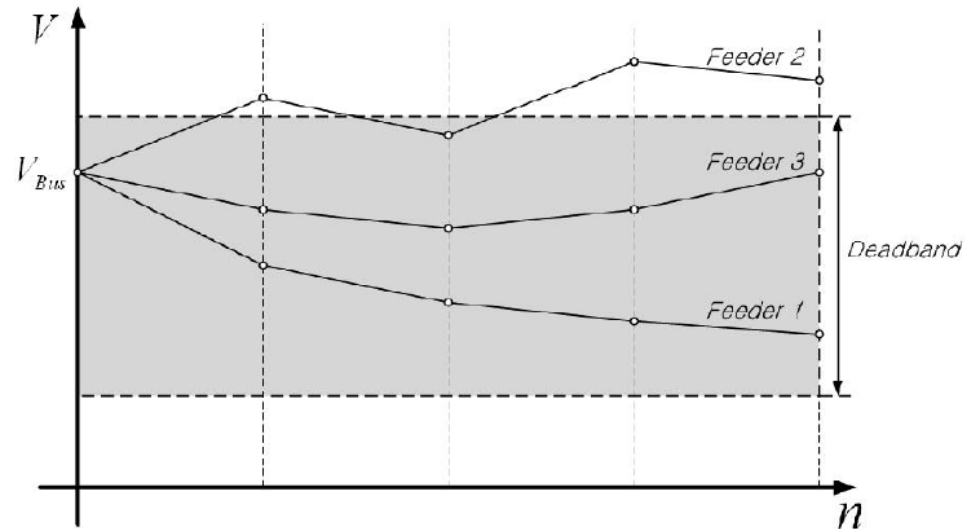
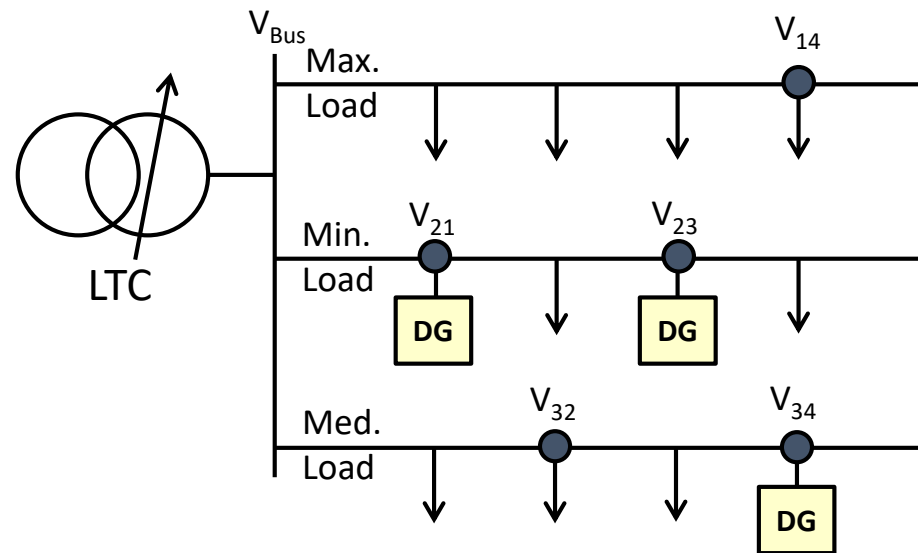


$$\Delta V = |V_S| - |V_R| \approx (P_L - P_G)R + (Q_L - Q_G)X$$



3 선로 간 전압 분포 불균형 심화

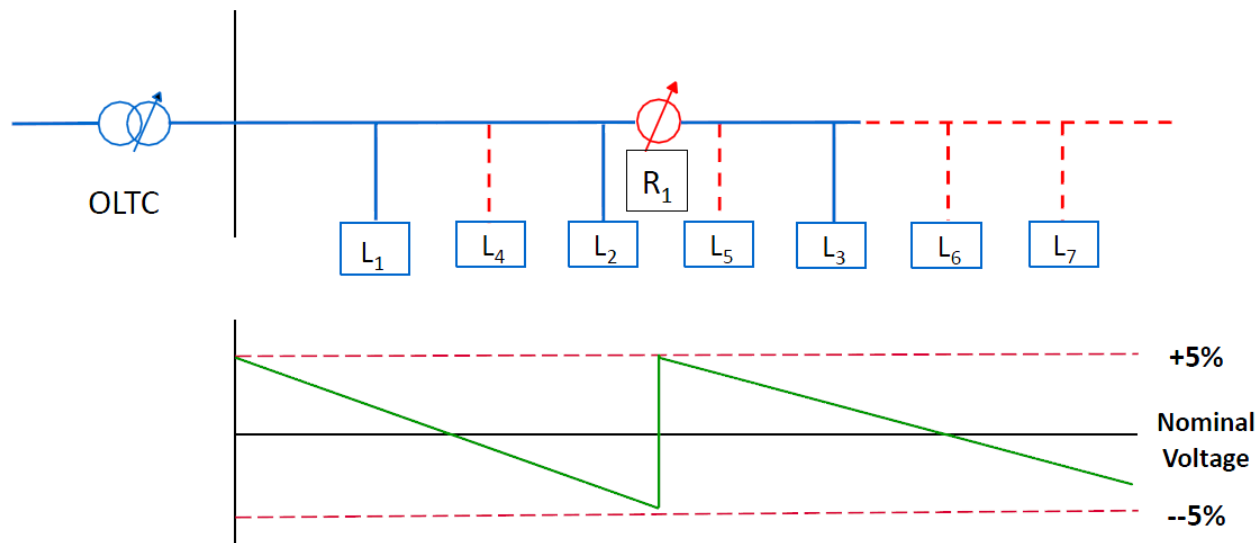
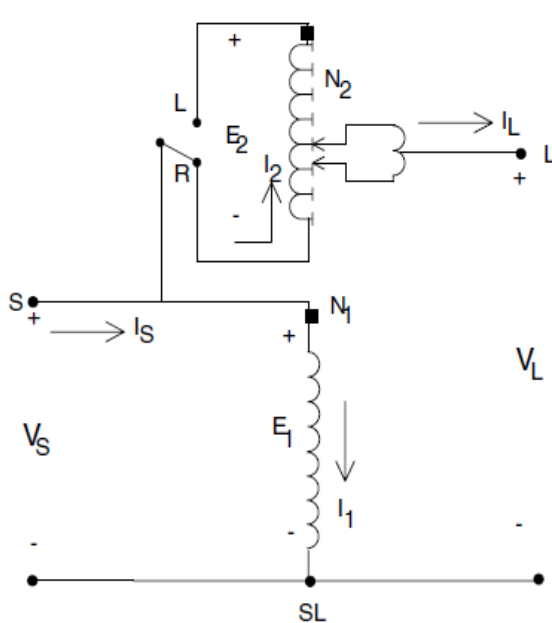
- 선로 간 부하 수준과 공장 차이로 인한 전압 강하 특성 차이 발생
- 분산전원 연계로 인한 전압 분포 불균형 심화
- 주변압기 OLTC 제어만으로 적정 전압 유지가 어려워짐



II 선로 전압 조정기(SVR)의 기본 원리

1 선로 전압 조정기 (SVR) 구성

- 장거리 배전선로 및 부하변동이 큰 배전선로의 전압조정 목적
- 주로 선로 중간에 설치되어 설치점 하단 영역의 전압 제어, 상별 전압 조정 가능
- 단권변압기(Autotransformer) + 제어기
- 표준형 SVR : 33 taps(32 steps) $\pm 10\%$, 1 step = 0.625%, 120V 제어 전압 $\rightarrow$ 0.75V

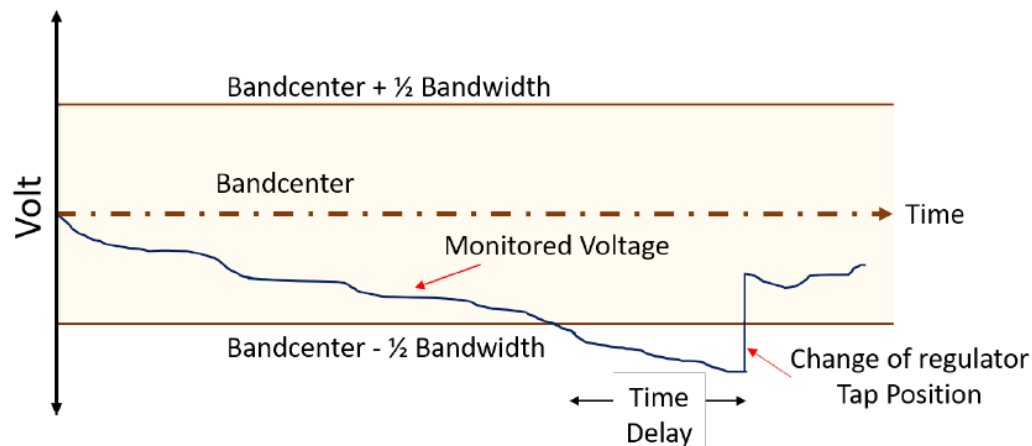
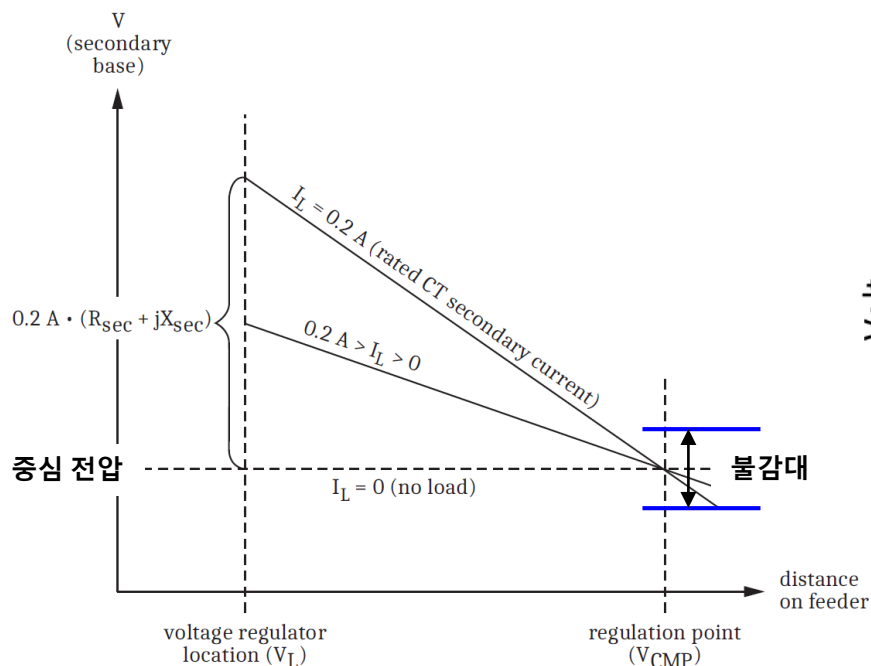


Applied at Substation and midpoint of Feeder.

II 선로 전압 조정기(SVR)의 기본 원리

2 SVR 제어 파라미터

- 중심(목표) 전압 : 전압조정 목표범위의 중심값으로 기본값 120V는 특고압 선로 13,200V에 해당
- 불감대(Band width) : 중심전압에 대한 허용오차로 기본 설정은 2V
- 지연시간(Time delay) : 불필요한 탭 동작을 방지하기 위한 지연 시간
- LDC(Line Drop Compensation) : SVR에서 가상의 부하 중심점까지의 선로 전압 강하의 모델

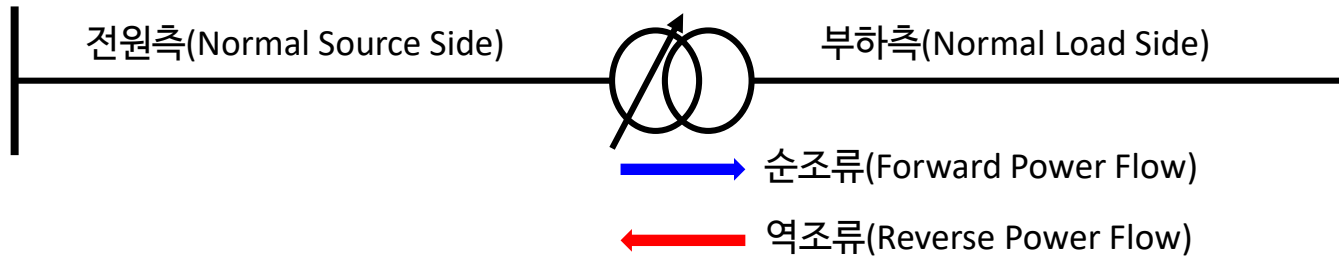


II

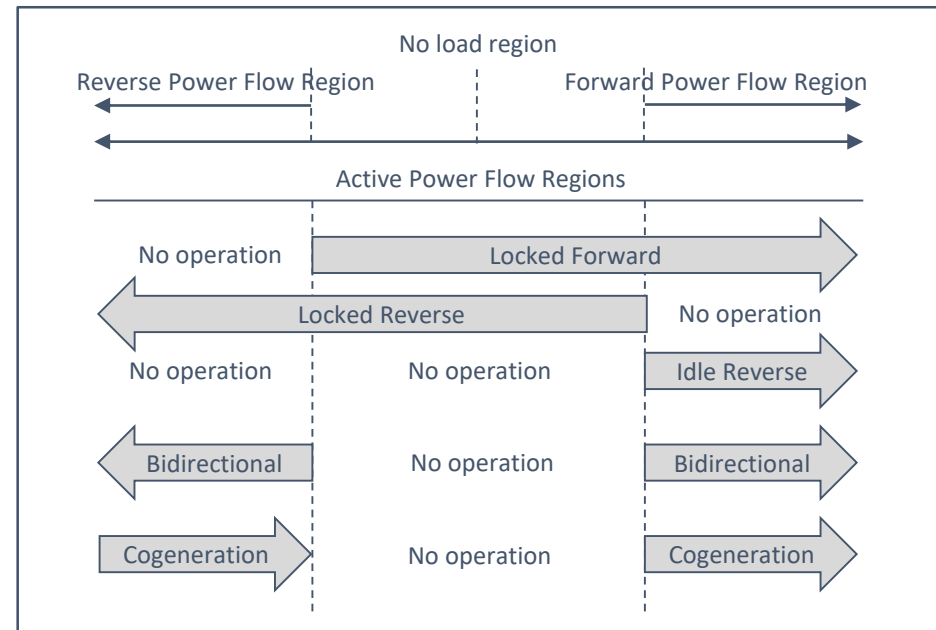
선로 전압 조정기(SVR)의 기본 원리

3 SVR 운전 모드

- 분산전원 및 부하전환 등으로 인한 조류 방향을 고려한 운전 모드

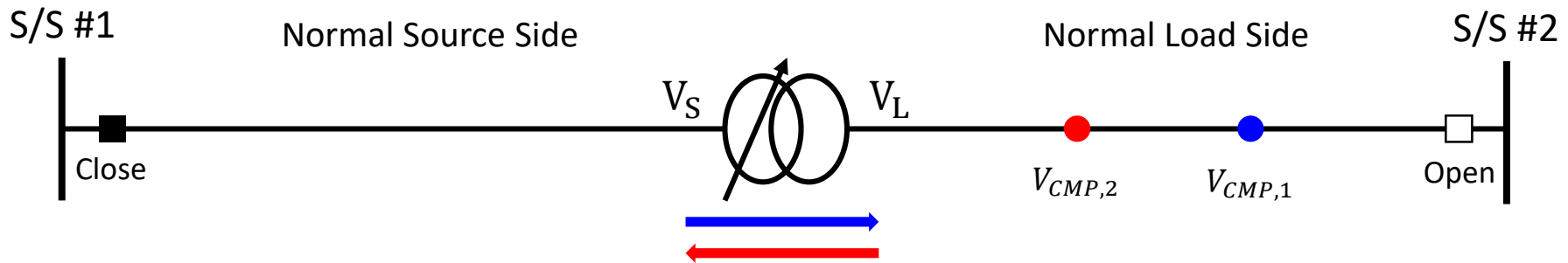


운전 모드	제어 특성
Locked Forward	상황 : 계통 내 조류 방향이 항상 정방향인 경우 적용 특징 : 조정 대상 <u>순방향 고정</u> (역조류 부동작)
Locked Reverse	상황 : 계통 내 조류 방향이 항상 역방향인 경우 적용 특징 : 조정대상 <u>역방향 고정</u> (순조류 부동작)
Idle Reverse	상황 : 계통 내 조류 방향이 항상 정방향인 경우 적용 특징 : 조정 대상 <u>순방향 고정</u> (무부하 및 역조류 부동작)
Bidirectional	상황 : 부하전환에 의해 정조류 및 역조류가 발생하는 계통에 적용 특징 : 계통 전원 방향 변경에 따라 <u>조정 대상 변경</u>
Cogeneration	상황 : 분산전원에 의해 정조류 및 역조류가 발생하는 계통에 적용 특징 : <u>역조류 시에도 조정 대상 순방향 고정</u>



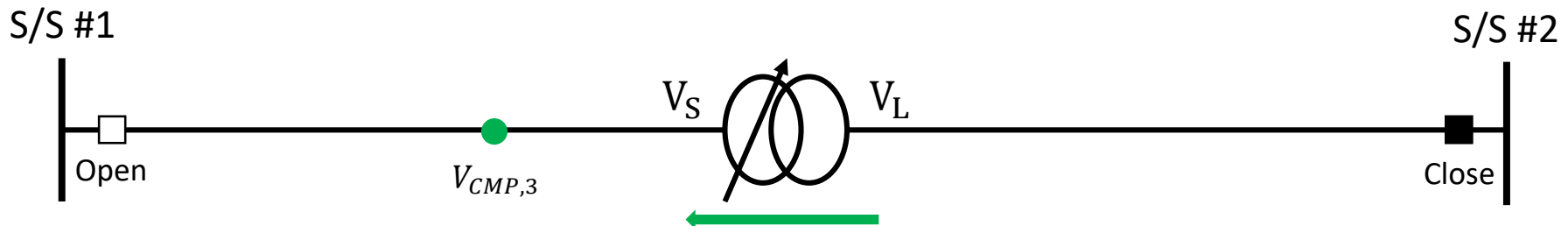
II 선로 전압 조정기(SVR)의 기본 원리

4 운전모드 및 조류 방향에 따른 LDC 파라미터의 적용



$$V_{CMP,1} = |V_L| - |I|(R_{sec,F} \cos \theta + X_{sec,F} \sin \theta) \quad \text{COGEN-Forward, BIDIR-Forward}$$

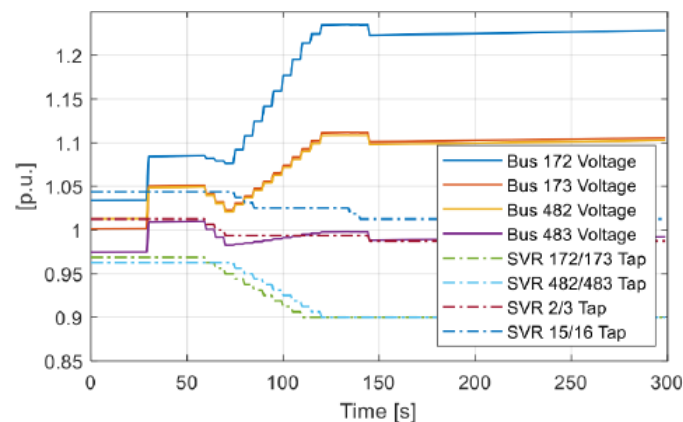
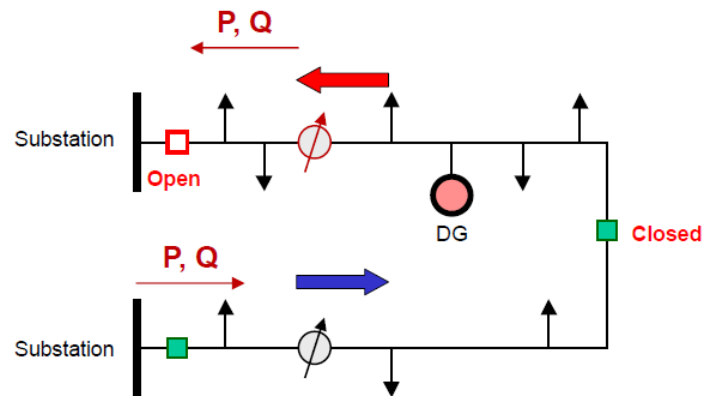
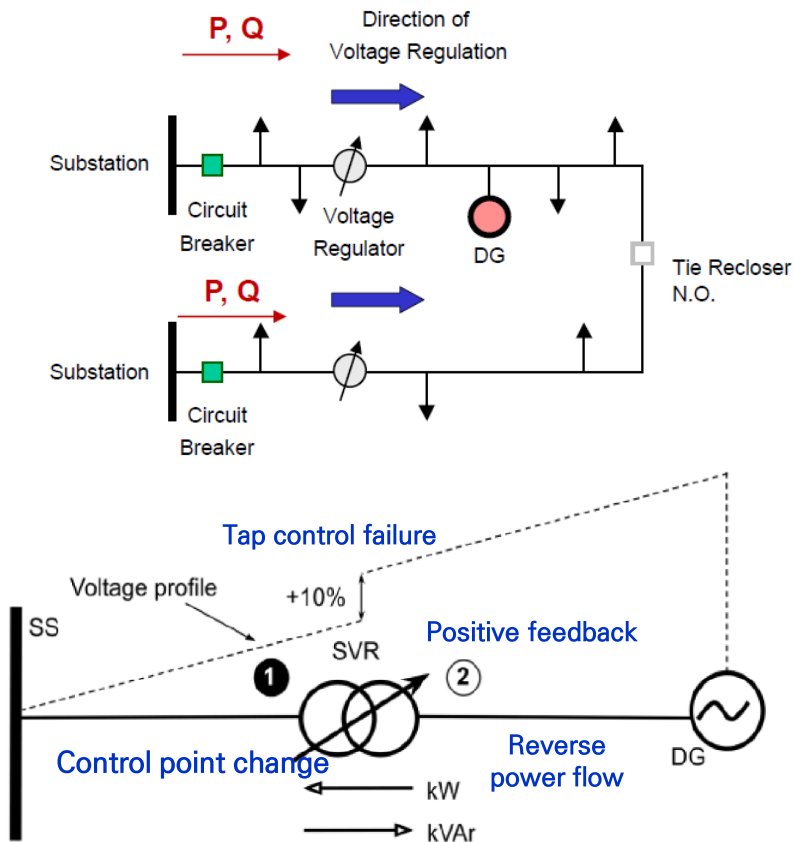
$$V_{CMP,2} = |V_L| - |I|(R_{sec,R} \cos \theta + X_{sec,R} \sin \theta) \quad \text{COGEN-Reverse}$$



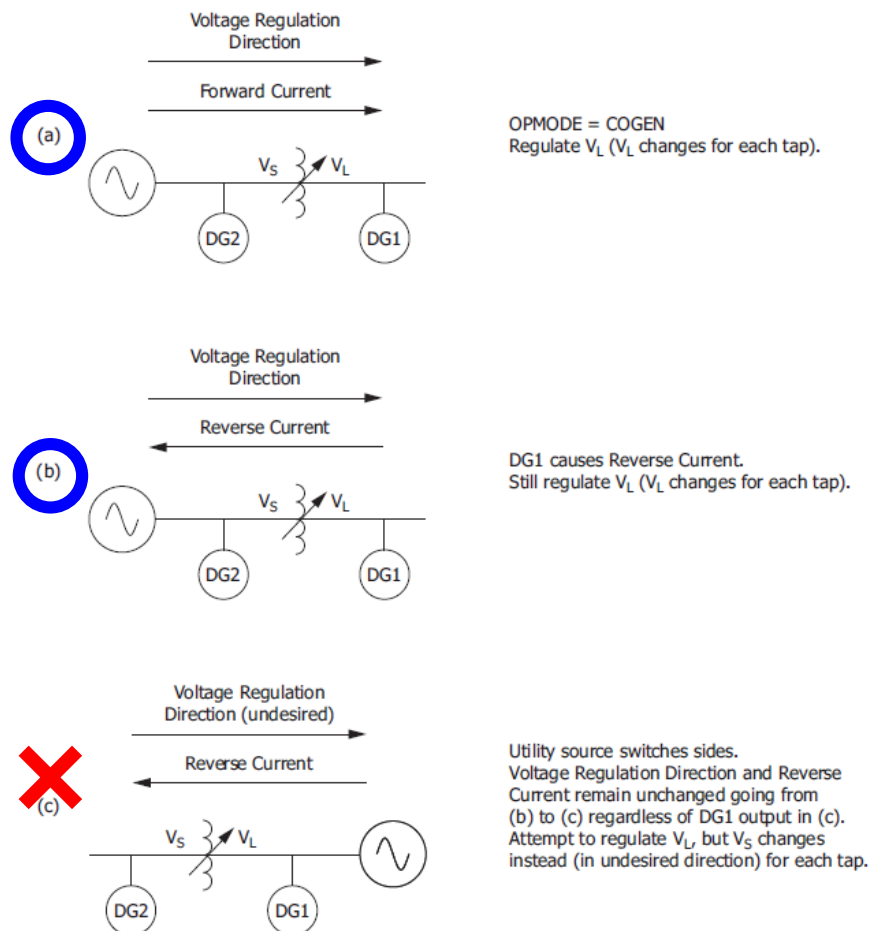
$$V_{CMP,3} = |V_S| + |I|(R_{sec,R} \cos \theta + X_{sec,R} \sin \theta) \quad \text{BIDIR-Reverse}$$

1 역조류 원인에 따른 SVR 제어 실패 (Runaway현상)

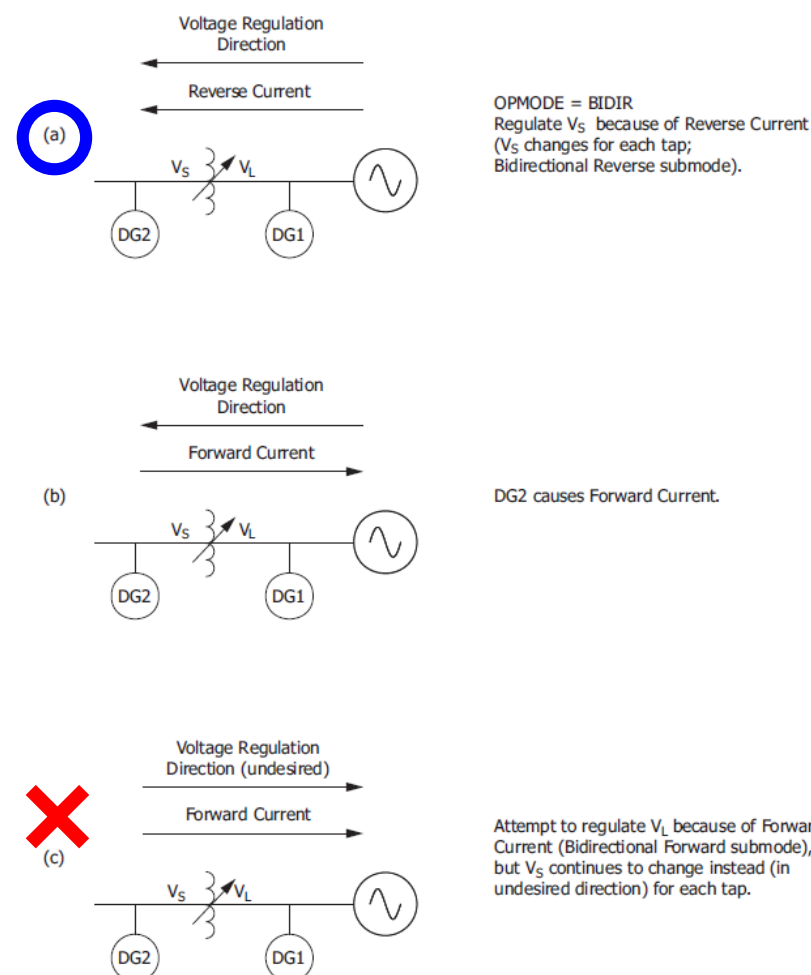
- 역조류 원인 : 분산전원 출력 증가, Loop 운전 중 부하전환
- Cogeneration 운전모드 적용 중 부하전환에 의한 역조류 발생 시
- Bidirectional 운전모드 적용 중 분산전원에 의한 역조류 발생 시



1 역조류 원인에 따른 SVR 제어 실패 (Runaway현상)



COGEN

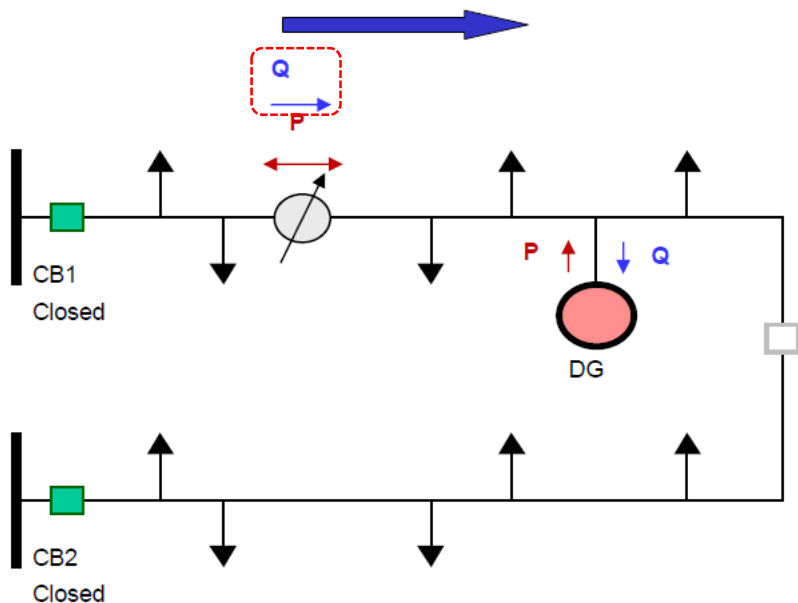


BIDIR

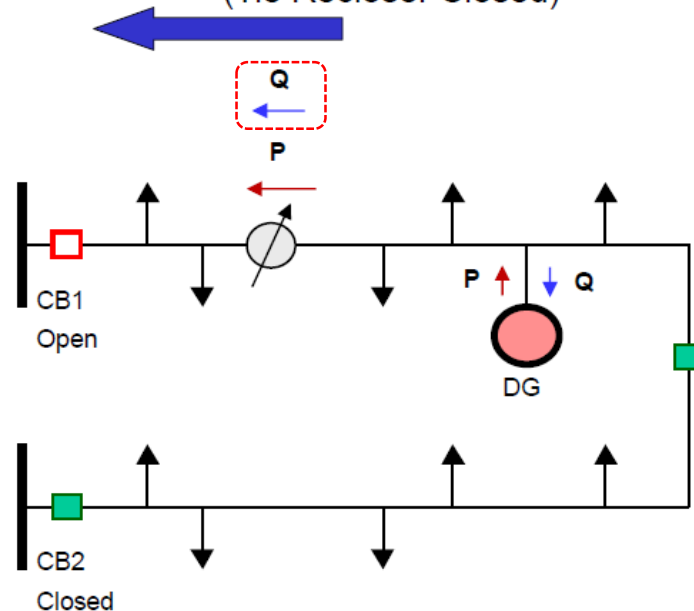
2 Reactive Bidirectional 모드

- 무효전력의 방향을 기준으로 조정 대상 (순방향, 역방향) 결정

Direction of voltage regulation during normal operat
(Tie Recloser Open)

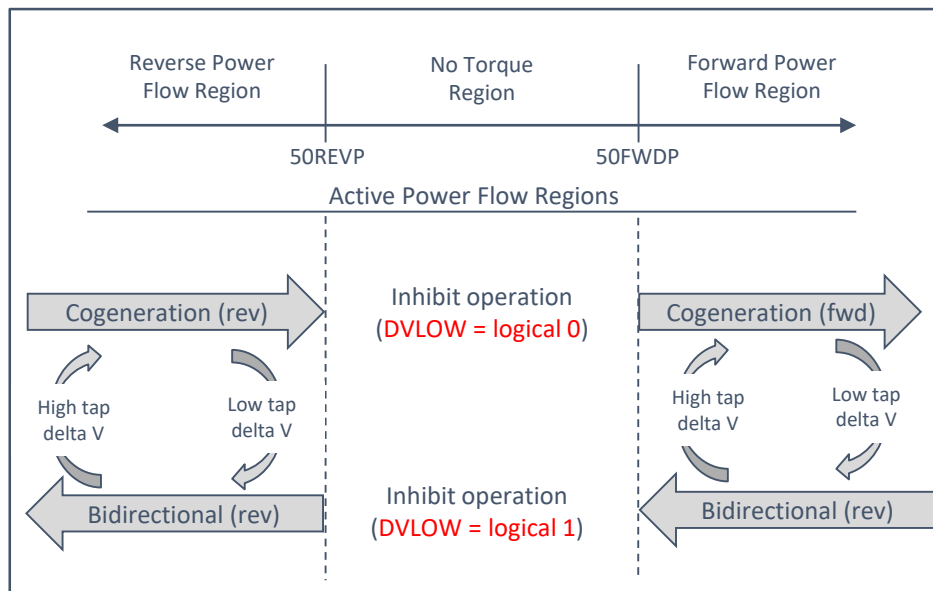
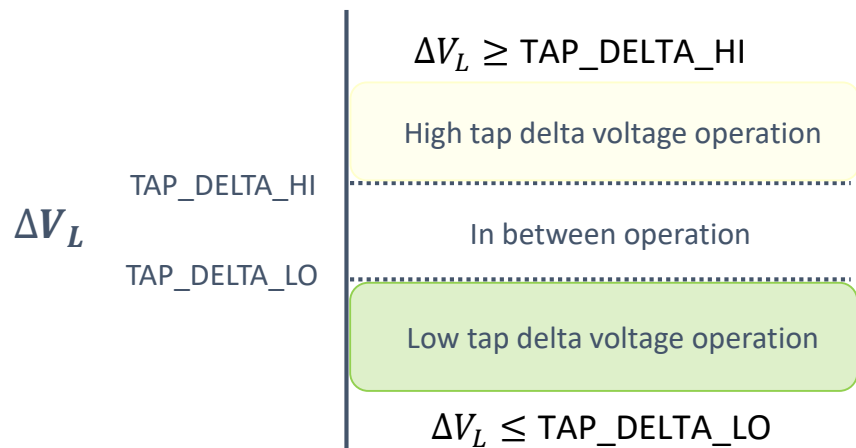


Direction of voltage regulation during
Loss of Source 1 (CB1 Open)
(Tie Recloser Closed)



3 Flexible DG 모드

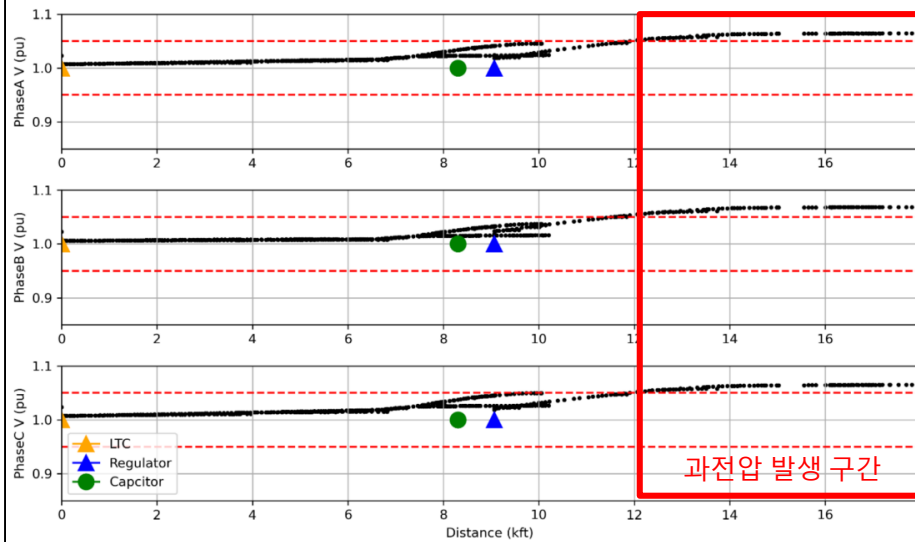
- 탭 변경 시 전압 변동의 크기를 기준으로 자체적으로 조정 대상 (순방향, 역방향) 변경
- SVR 2차측 전압 변동 크기(ΔV_L)와 사용자 입력 설정 (TAP_DELTA_HI, TAP_DELTA_LO) 비교
- 상황에 따라 Cogeneration 모드와 Reverse Bidirectional 모드로 선택적 운전



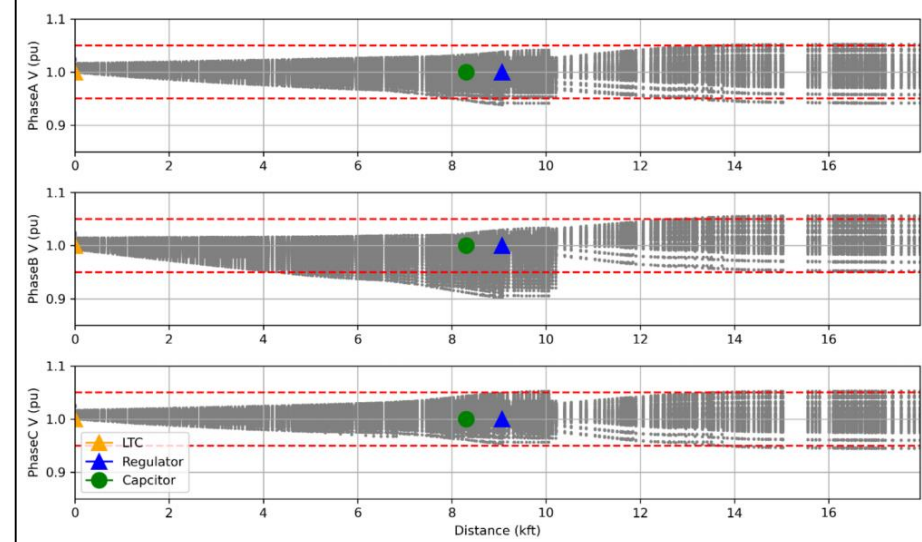
1 SVR 파라미터 설정에 따른 계통 영향 평가

- Worst case 시나리오 (최소 부하, 최대 발전)
 - 분산전원으로 인한 과전압 문제를 가장 잘 나타냄
 - 계통의 비선형성, SVR의 불연속적 제어 특성을 모두 고려하기 어려움
- 가변 부하, 발전의 다양한 시나리오에 대한 해석 필요
 - 구간에 따라 과전압, 저전압 문제 발생 위치와 조건이 다양하게 존재

Case A : low load (30%), peak PV generation (100%)

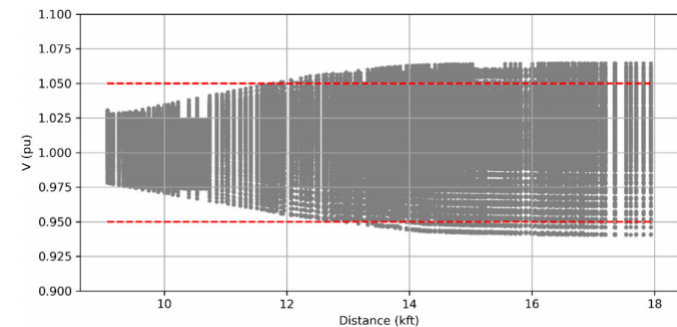
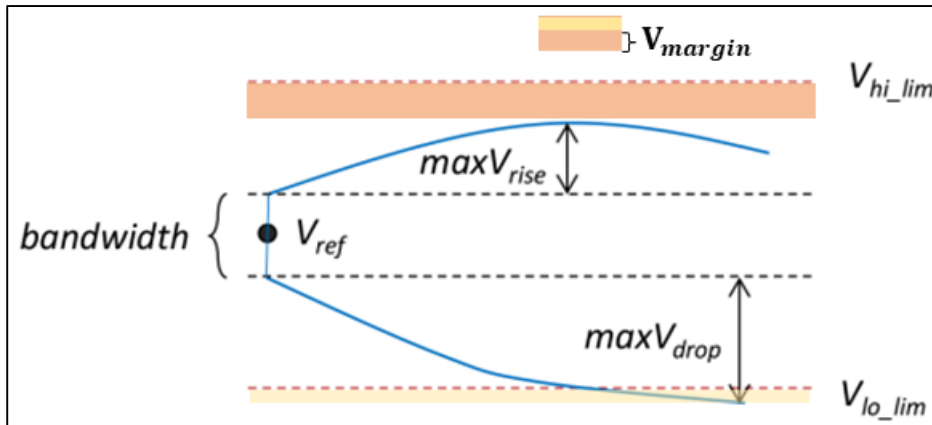


Case B : low load (30~100%), peak PV generation (0~100%)

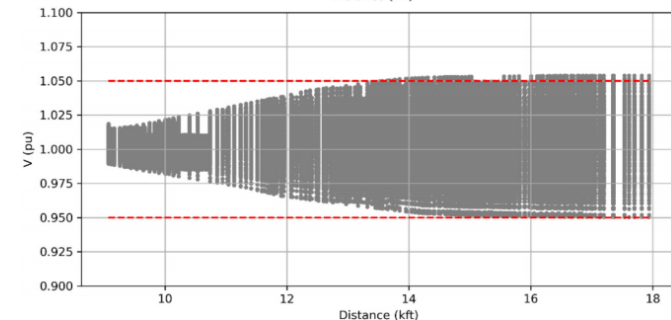


2 목표전압과 불감대 설정

- 최대 전압강하와 최대 전압상승을 고려한 전압 여유 (V_{margin})
 - $V_{margin} = (V_{hi_lim} - V_{lo_lim}) - (maxV_{rise} + maxV_{drop})$
- 불감대(Bandwidth) 설정
 - $V_{margin} > 0$ 이면, $bandwidth < V_{margin}$ ($V_{margin} < 0$ 이면 전압 제어 불가)
- 목표전압 (V_{ref}) 설정
 - $V_{lo_lim} + maxV_{drop} + \frac{bandwidth}{2} < V_{ref} < V_{hi_lim} - maxV_{rise} - \frac{bandwidth}{2}$



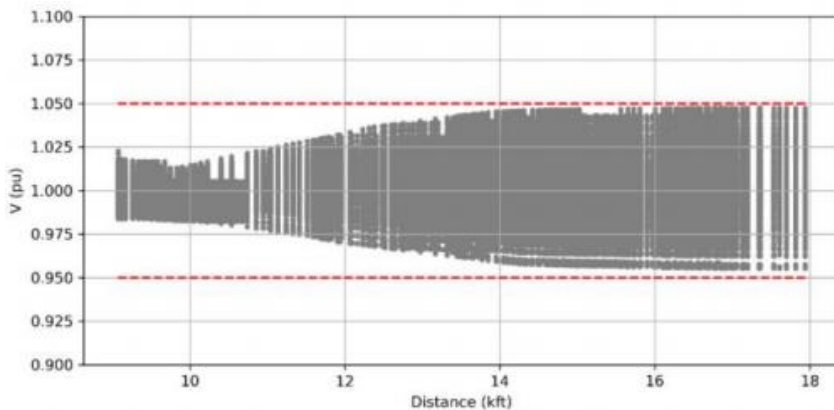
Bandwidth
= 4V



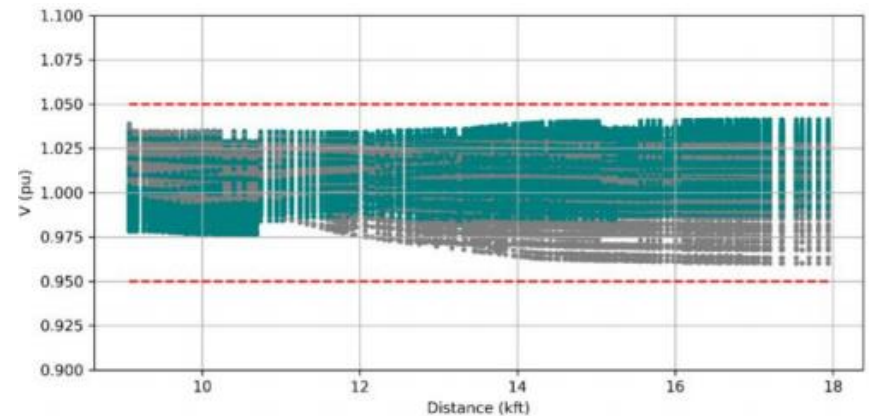
Bandwidth
= 1V

3 LDC 제어 적용

- LDC 파라미터 적용
 - 가상의 제어 점 설정 : $LDCR = 3[V]$, $LDCX = 15[V]$
 - SVR 하단의 전압 변동 폭 감소 → 모든 구간의 전압 문제 해소 가능
- 조류 방향에 따라 파라미터 설정 변경 (Cogeneration 모드)
 - 순방향 조류 (전압 강하)와 역방향 조류 (전압 상승)에 따라 파라미터 차등 적용
 - 모든 구간에서 전압 문제 해소, 효율적인 전압 관리 가능



$V_{ref} = 119.5V$, Bandwidth = 4V, $LDCR = 3[V]$, $LDCX = 15[V]$

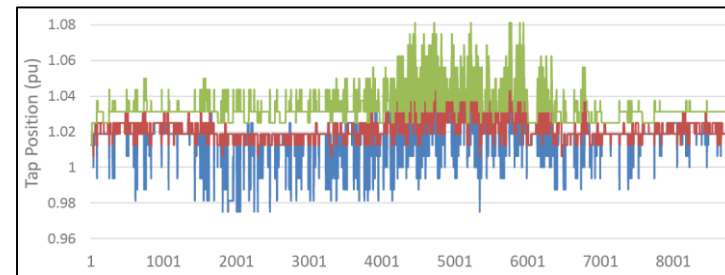
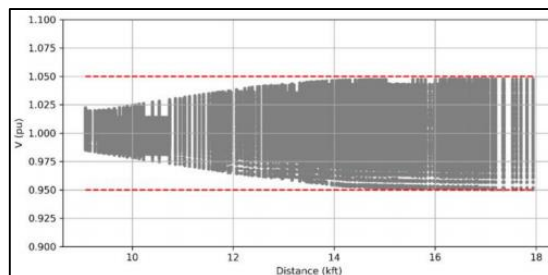
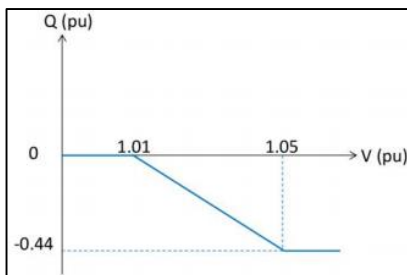


Forward Flow : $V_{ref} = 123V$, Bandwidth = 2V

Reverse Flow : $V_{ref} = 119V$, Bandwidth = 2V

4 Smart Inverter와 SVR의 협조

- Smart Inverter Volt/Var 제어 적용
 - SVR에 LDC 제어 적용하지 않고 모든 구간에서 전압 문제 해소 가능
 - 단, 협조가 이루어지지 않는 경우 SVR 탭동작 횟수 과도하게 증가 → 기기 수명 단축



- 분산전원의 영향을 고려한 SVR 파라미터 설정

파라미터	분산전원의 영향 완화 방안	문제점 (부작용)
목표전압(V_{ref})	DER의 높은 출력에 따른 과전압 상황에서 목표전압을 낮게 설정하면 과전압 문제 완화	Peak 부하 상황에서 DER의 낮은 출력 시 저전압 문제 발생 우려
불감대(Bandwidth)	불감대를 늘려 탭 제어 횟수 저감	전압 제어 효과 저하 : 전압 변동 증가
지연시간(Time delay)	- 지연시간을 늘려 탭 제어 횟수 저감 - 전압변동 크기에 따라 지연시간 조정 (inverse time delay)	- 전압 제어 효과 저하 - DER의 급격한 출력 변동에 대응 불가 - 전압 제어기(LTC, CBs, SVR, SI)의 지연시간 협조 재조정 필요

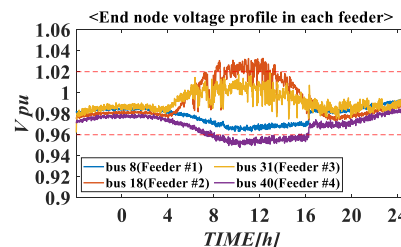
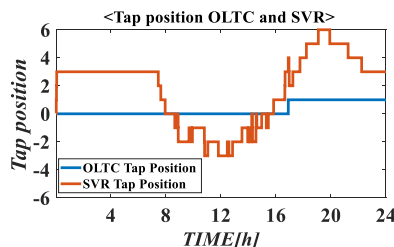
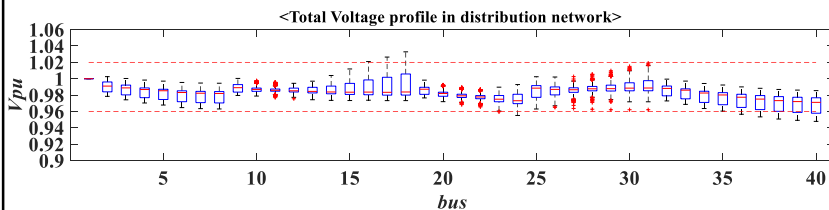
4 Smart Inverter와 SVR의 협조

- Smart Inverter와 SVR의 파라미터 협조 설정을 통해 전압 제어 효과 향상, 탭 제어 횟수 감소 가능
 - Case A : 과전압 및 저전압 문제 다수 발생, SVR 빈번한 탭 제어 수행(47회)
 - Case B : 전압 문제 완화 및 SVR의 탭 제어 횟수 저감(7회) → 전압 제어 효과 향상

Case A (with SVR)

- ✓ 저전압 및 과전압 문제가 다수 발생하는 계통에서 OLTC 및 SVR을 활용한 전압 문제 해결 X → 추가적인 설비 필요

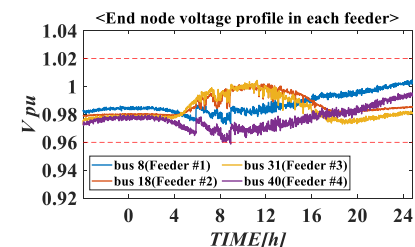
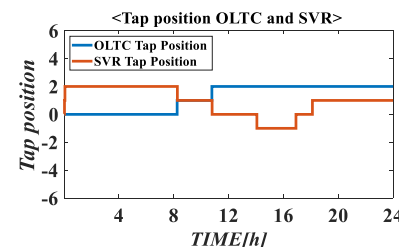
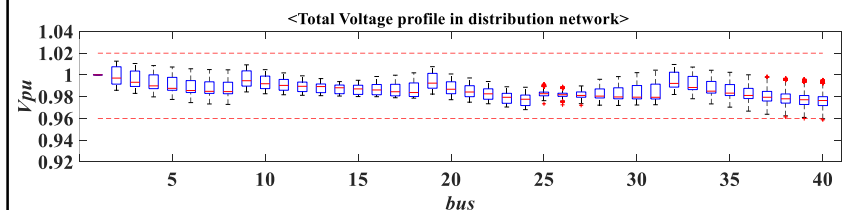
Performance Index ($\sum(V_{nom} - V_{t,i})^2 * 100$)	탭 제어 횟수	
	OLTC	SVR
2205	1	47



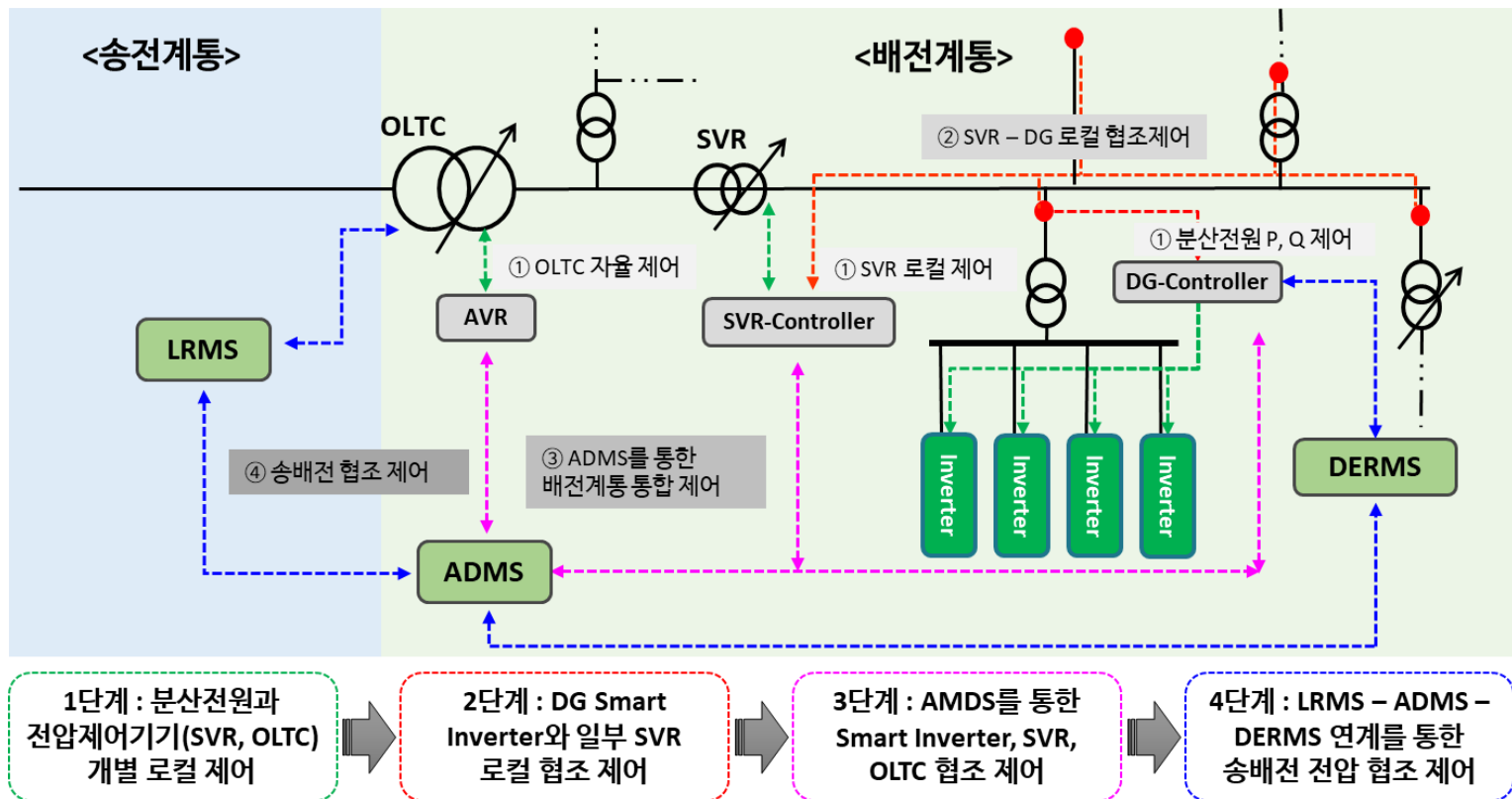
Case B (with SVR + Smart Inverter)

- ✓ Smart Inverter의 Volt/Var Curve 기능과 SVR 협조 제어를 통해 전압 문제 해결 및 제어 효과 향상

Performance Index ($\sum(V_{nom} - V_{t,i})^2 * 100$)	탭 제어 횟수	
	OLTC	SVR
1407	2	7



- SVR은 분산전원 연계 선로의 전압 문제 완화를 통해 선로 증설 지연, 분산전원 수용률 향상
- SVR 제어기의 새로운 운전 모드 및 파라미터에 대한 분석 필요 : HILS 시험
- 다양한 시나리오를 통해 최적의 운전 모드, 파라미터 설정 필요 : 시계열 모의 분석
- 단기적으로 분산전원의 Volt/Var 제어와 SVR의 로컬 협조 제어
- 중장기적으로 ADMS 연계를 통한 상위 협조 운영 및 주기적인 제어 파라미터 재선정



참고문헌

- 1) IEEE Std 1547-2018 : IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces
- 2) 능동배전망 체계를 위한 한전의 배전망 운영전략, KEPCO
- 3) Step Voltage Regulators, Don Wareham
- 4) A review on voltage control methods for active distribution networks
- 5) SEL-2431 Voltage Regulator Control Instruction Manual, SEL
- 6) System Design Practices with Penetration of DER, EPRI
- 7) Tuning Strategy of Voltage Regulators in High DER Penetration Feeders, EPRI



Thank You
감사합니다.