

AI 데이터센터 밀집계통의 말단 전압보호를 위한 병렬콘덴서 최적 설치위치 선정

조준범*, 이종훈*, 정성엽*, 김동수*, 한상욱*
가천대학교*

Optimal Bus Selection for Shunt Capacitor Placement for End-of-Line Voltage Protection in AI Data Center-Dense Power Systems

Junbum Cho*, JongHoon Lee*, Seongyeop Jung*, Dongsu Kim*, Sangwook Han*
Gachon University*

Abstract - 최근 ai의 발달로 데이터센터의 건설과 수요가 증가하면서 전력계통의 말단에 대용량 부하가 집중되고 있다. 이로 인해 말단 부하에 저전압이 유도되어 전압 안정도를 저하시킬 뿐만 아니라 이에 연계되어 있는 재생에너지에도 영향을 미치고 있다. 따라서 본 연구는 성남에 존재하는 5개의 데이터센터 축약 밀집 계통을 구성하고, 병렬 콘덴서를 이용한 전압 보상 방안을 검토하였다. 동일 용량의 병렬 콘덴서를 각 모선에 순차적으로 설치한 결과, 최저 전압을 가지는 모선에 직접 설치한 경우가 가장 개선량이 높았으며, 공급 모선에 설치한 경우 각 말단 부하에 균등하게 전압을 개선함을 확인하였고, 이를 통해 최적 설치 모선을 도출했다.

1. 서 론

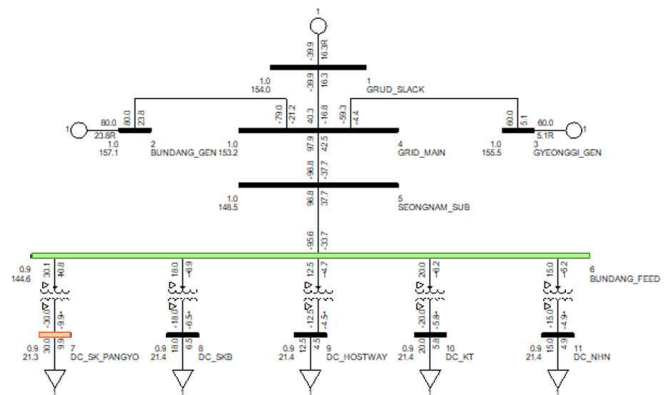
국내에서는 최근 "지속 가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략"이 수행되고 있으며, "기후 위기 대응을 위한 탄소중립-녹색성장 기본법"과 같은 법률 또한 제정되었다[1], [2]. 전력부문에서도 저탄소 전환이 추진되고 있고 이에 따라 태양광 및 풍력에너지뿐만 아니라 재생에너지 계통이 확대되고 있다. 동시에 ai의 기술발전과 수요의 증가로 판교와 같은 지역에 데이터센터의 건설과 전력 수요가 급격히 증가하고 있는 추세이므로 인해 전력계통 말단에 대용량의 부하가 집중되고 있다[3]. 대용량의 부하는 말단 부하에 유효전력뿐만 아니라 ups, 변압기, 냉각설비, 전력변환 장치 등의 운전 특성에 따라 무효전력의 증가를 요구한다. 이러한 유효 및 무효전력의 증가는 선로에 큰 전압강하를 발생시켜 저전압을 유도한다[4]. 데이터센터와 동일 전력계통, 변전소, 송배전 구간이 연결되어 있는 재생에너지 설비는 이러한 저전압 상황에서 출력 제한 또는 보호 동작의 영향을 받을 수 있고 심한 경우 계통 분리를 유발하여 전압 안정도를 악화시킨다. 이를 통해 데이터센터에서 소비하는 주된 전력은 유효전력이지만 무효전력 또한 전압 안정도 저하에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 본 연구는 이를 해결하고자 하는 방안으로 무효전력을 보상하여 전압강하를 개선할 수 있는 병렬 콘덴서를 도입하고자 한다[4]. 성남 분당 판교지역의 밀집된 데이터센터의 전력계통 구조를 참조하여 축약 전력계통을 구성하였고, 각 모선에 순차적으로 병렬 콘덴서를 설치하며 설치 위치별 전압 개선량을 비교하여 ai 데이터 센터 밀집 계통에서 말단 전압 보호를 위한 병렬 콘덴서 최적 설치 위치를 선정하고자 한다.

2. 본 론

2.1 축약 전력계통 구성 및 모델링

본 연구는 성남시 분당구에 있는 Sk, Skb, Hostway Idc, Kt 분당 Idc, Nhn 판교 5개의 대용량 부하인 데이터센터를 바탕으로 축약 전력계통을 구성하였다. 1번 모선은 기준 모선으로 상위 전력계통을 표현하였고 나머지 2, 3번 모선은 각각 분당과 경기의 발전소를 가정하여 발전기 PV 모선으로 설정하여 계통에 유효전력을 공급하면서 주변 전압을 일정 수준으로 유지하게 하였다. 또한 4번은 상위 계통 주 공급 모선, 5번은 성남 변전소 측 모선, 6번은 데이터센터 부하의 공통 공급 모선을 표현하였고, 7~11번

모선은 앞서서 언급한 5개의 데이터센터를 기준으로 한 말단 부하 모선이다. 또한 발전기, 변압기, 부하, 송전선로의 R, X, B, P, Q 등의 파라미터 값들은 실제 계통 구조를 참조하여 적용했지만, 조류 해석이 용이한 방향으로 설정하였다. 아래 그림은 PSSE 프로그램으로 이를 표현한 축약 전력계통 단선도이다.



〈그림 1〉 성남·분당 데이터센터 밀집계통의 단선도

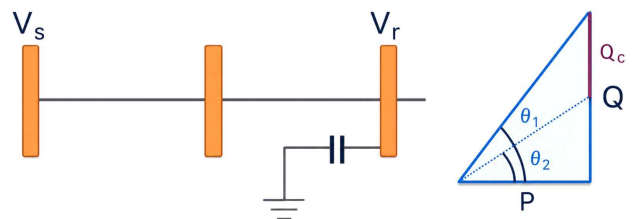
2.1.1 전압강하 및 병렬콘덴서 이론

전력계통에서 전압강하는 선로의 임피던스에 의해서 발생하고, 말단 부하가 집중된 계통에서는 그 정도가 심해진다. 전압강하는 아래식과 같이 다양하게 표현된다.

$$e = V_s - V_r = \sqrt{3} I (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (1)$$

$$e = \frac{P(R + X \tan \theta)}{V_r} = \frac{PR + XQ}{V_r} \quad (2)$$

2번 식을 통해서 알 수 있듯이 무효전력 성분은 전압강하에 큰 영향을 미치고, 이러한 무효전력은 데이터센터와 같은 저역률 부하에서 크게 발생한다. 말단 부하의 전압을 보호하기 위해 본 연구에서는 병렬 콘덴서를 적용하였다.



〈그림 2〉 병렬 콘덴서 투입 예시와 무효전력 보상 개념도

그림을 통해 병렬 콘덴서는 무효전력 성분을 줄여 전압강하를

줄임으로써 말단 전압을 보호한다는 것을 확인할 수 있고, 그 용량에 관한 식은 아래에 나타난 3번식으로 확인할 수 있다.

$$Q_c = P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2) = Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

2.2 병렬콘덴서 설치 위치별 전압 개선 특성 분석

병렬 콘덴서 설치 위치별 전압 개선 특성을 분석하기 위하여 순차적으로 축약 전력계통의 11개의 모선에 동일 용량의 병렬 콘덴서를 설치한 후 전력조류 계산을 수행하였다. 말단 부분의 전압을 관찰을 중점적으로 수행하였으며, 아래는 전압 변화에 대한 표이다.

〈표 1〉 병렬콘덴서 설치에 따른 부하모선의 전압 변화

모선	콘덴서 설치X	6번 모선 설치	7번 모선 설치	8번 모선 설치	9번 모선 설치	10번 모선 설치	11번 모선 설치
7	0.9288	0.9346	0.9384	0.9346	0.9346	0.9346	0.9346
8	0.9325	0.9383	0.9383	0.9421	0.9384	0.9384	0.9384
9	0.9342	0.9400	0.9400	0.9400	0.9441	0.9401	0.9400
10	0.9330	0.9388	0.9388	0.9388	0.9388	0.9426	0.9388
11	0.9341	0.9399	0.9399	0.9399	0.9399	0.9399	0.9437

병렬 콘덴서를 설치하지 않은 기준 상태에서 계통 내의 전압은 pu 법을 통해 표현 시 발전기 모선과 그 근처 모선인 1~5는 각각 1, 1.02, 1.01, 0.9948, 0.9643 pu로 1pu를 넘거나 이에 근사하였고 그로부터 먼 6~11은 점점 작아지는 경향을 보였다. 기준 상태에서 계통의 최저 전압은 7번 모선에서 0.9288pu로 나타나 7번 모선의 변화를 중심으로 하여 설치 위치별 효과를 분석하였다. 병렬 콘덴서를 1~3번 모선에 설치 시에 최저 전압은 기준 상태와 동일하였고, 4~5번 모선에 설치 시에는 각각 0.0013, 0.0039pu만큼 소폭 개선된 것을 확인할 수 있었다. 이는 1~5번 모선은 7번 모선으로부터 거리가 멀어 무효전력을 직접적으로 보상하지 못해 전압강하 개선량이 크지 않았기 때문으로 판단된다. 6번 모선에 병렬 콘덴서 설치 시에는 7~11번 부하 모선이 모두 동일하게 0.0058pu만큼 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 6번 모선이 7~11번에 공통으로 연결된 모선이기 때문으로 판단된다. 7번 모선에 병렬 콘덴서 설치 시 최저 전압 개선량은 0.0096pu로 가장 크게 나타났으며 이는 최저 전압 모선에 직접적으로 병렬 콘덴서를 설치하여 무효전력을 효과적으로 보상하였고, 이를 통해 무효전력 요구량을 감소시켜 전압강하를 감소시켰기 때문이다. 8~11번 모선에 설치 시에는 직접적으로 설치된 각 모선은 모두 0.0096, 0.0099, 0.0096, 0.0096 pu 만큼 크게 개선 되었지만 최저전압을 나타내는 7번 모선의 전압 개선량은 앞선 모선인 1~6번 모선 보다는 크게 나타났지만 7번 모선에 직접 설치했을때보다는 크지 않았다. 이는 계통 내의 최저 전압을 나타내는 7번 모선 인근에 설치 시 전압 개선량은 커지지만 최저 전압을 나타내는 곳에 직접적으로 설치하는 않는다면 그 개선량을 제한될 수 있다는 것을 알 수 있다. 이해를 돕기위해 아래에 히트맵으로 개선량을 비교하여 표현했다.



〈그림 3〉 병렬콘덴서 설치위치에 따른 전압 개선량

히트맵을 통해 다시 본다면 축약 전력계통에서 최저 전압을 개선하는 개선량을 기준으로 보게 될시 7번 모선과 같이 최저 전압을 가지는 모선에 직접 설치하는 것이 최저 전압을 가지는 부하의 말단 전압을 직접 보호하는 가장 효과적인 설치 위치이고, 최저 전압 개선량이 아닌 각 말단 부하의 모선 전체에 무효전력 흐름을 줄이고 균등하게 전압을 개선하여 전압 분포를 안정화하는 것을 기준으로 본다면 7~11번 모선에 공통으로 연결된 6번 모선과 같이 각 말단 부하에 공통적으로 연결되어 전력을 공급하는 모선에 설치하는 것이 병렬 콘덴서의 최적의 설치 위치이다.

2.2.1 축약계통 해석 결과를 반영한 실제 계통 설치 위치 선정

앞선 축약 전력계통에서 병렬 콘덴서의 최적 설치 위치는 2가지로 나타났으며, 최저 전압을 나타내는 7번 모선에 설치하는 경우와 7~11번의 부하 모선에 공통으로 전력을 공급하는 6번 모선에 설치하는 경우 2가지로 나타났다. 이를 실제 계통에 대응시켜 본다면, 7번 모선은 실제로 전력을 공급받는 수전단 데이터센터 부하 중 저전압이 가장 크게 나타나는 말단 부하에 해당한다. 즉 실제 계통에서 말단 전압 보호를 최우선으로 할 경우 최저 전압을 나타내는 데이터센터 수전단 부근에 설치하는 것이 최적의 설치 위치이다. 6번 모선은 전력이 수전단으로 나뉘기 전 변전소 하위 공급 구간 혹은 분기 지점에 해당한다. 즉 여러 말단 데이터센터의 전압을 전체적으로 균등하게 개선하는 것이 목적이라면 데이터센터 밀집 구간에 전력을 공급하는 변전소 2차 측 인출 지점이나 데이터센터 수전단 부근으로 전력이 분기되기 전의 공통 공급 지점에 설치하는 것이 최적의 설치 위치이다. 즉 실제 계통에서 병렬 콘덴서의 최적 설치 위치를 선정하기 위해선 조류 해석을 통해 최저 전압이 나타나는 데이터센터 수전단을 확인하고, 해당 수전 지점에 직접 설치하는 법과 데이터센터 밀집 계통의 공통 공급 지점에 설치하는 방안을 비교하여 가장 적합한 방안을 선택해야 한다. 이뿐만 아니라 병렬 콘덴서를 투입하기 위한 설치 공간, 고장 시 보호계전기의 동작 및 보호 협조, 유지 보수와 접근성 등을 종합적으로 고려하여 선정해야 한다.

3. 결 론

본 논문은 데이터센터 밀집 계통의 말단 부하에서 발생하는 저전압 문제를 완화하고자 병렬 콘덴서의 설치 위치에 따른 전압 개선량을 분석하였다. 분석 결과 최저 전압을 나타내는 말단 부하에 설치하는 경우가 전압 개선량이 가장 컸으며, 각 말단 부하로 전력을 공급하는 공급지점에 설치하는 경우도 좋은 설치 위치가 될 수 있음을 확인하였다. 추후 후속 연구에서는 전압뿐만 아니라 주파수, 위상각, 병렬 콘덴서 설치 공간, 보호 협조 등을 함께 종합적으로 분석한다면 더 적합한 위치를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원을 받아 수행된 기초연구과제 (과제번호: R25X003-4) 및 중소기업 기술개발지원사업(RS-2026-25522643) 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 대한민국정부, “대한민국 2050 탄소중립 전략,” 2020.
- [2] 국가법령정보센터, “기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법.”
- [3] 김철현, 김성균, “AI 시대 데이터센터 증가의 국내 에너지 소비 시사점”, 에너지경제연구원 기본연구보고서, 기본 25-09, 2025.
- [4] 김영록, 차한주, “무효전력 보상기를 이용한 저압 배전계통 전압 상승 억제 및 실증”, 한국태양에너지학회 논문집, 제40권 제6호, pp. 23-33, 2020.