계통과 분산전원 상호간의 영향 및 응답특성

이영진, 바이사, 한동화, 김영식, 조진파, 최규하
건국대학교 전력전자연구실

Response Characteristics and Effects between Utility and Distributed resource

Young-Jin Lee, Bayasgalan, Dong-Hwa Han, Qinbo Cao, Young-Sik Kim, Gyu-Ha Choe
Konkuk University

ABSTRACT

현재 전력사업 분야에서는 산업화의 발전과 더불어 전력수요의 갑작스러운 증가와 전 세계적인 지구 온난화 문제를 해결하기 위해서 환경 친화적인 분산전원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문은 분산전원 시스템의 안정성 및 고효율 운전을 위해 계통과 분산전원 상호간의 영향에 대한 연구를 하였다. 계통과 분산전원의 연계시 계통전원의 악영향에 대한 PV 시스템의 응답특성을 과전압 및 부족전압, 순간정전, 전압 써지 등으로 구분하여 각각에 대한 응답특성을 확인하고, 분산전원의 이상 출력이 계통에 미치는 영향을 IEEE 929-2000의 규정을 바탕으로 시뮬레이션 환경을 만들고 각각의 경우에 대한 응답특성을 주파수 허용 변동범위(59.3Hz~60.5Hz)로 확장하여 계통과 PV시스템 상호간의 영향 및 응답특성을 확인 할 수 있었다

1. 서론

현재 배전계통에 태양광, 풍력, 연료전지 등 계통 연계형 분산전원이 많이 확대되고 있으며 이러한 시스템은 다수의 타 분산전원과 함께 계통에 확대 보급될 경우 많은 문제점들이 예상된다. 분산전원이 계통에 연계되어 운전시의 문제로는 전력품질(전압변동, 주파수 ,고조파, 역률 등)의 문제, 계통 및 시스템 설비간의 보호협조문제, 분산전원의 단독운전으로 인한 인사사고 문제 등을 들 수 있다. 또한 대규모의 분산전원 도입시 상호 분산전원간의 이상 출력이 연계된 시스템에 미치는 악영향을 생각 해 볼 수 있다. 상기의 요인들을 종합해보면 태양광 시스템과 같은 분산전원 시스템이 계통 운용에 미치는 부정적 요인들의 원인과 특성을 알아 볼 필요가 있다. 본 연구에서는 태양광발전시스템에서 사용되고 있는 전력변환장치의 관점에서 과전압 및 부족전압, 순간정전 및 전압써지 등의 계통의 악영향에 대한 PV 시스템의 응답특성과 분산전원의 이상 출력이 계통에 미치는 영향을 IEEE 929-2000의 규정을 바탕으로 시뮬레이션 환경을 만들고 각각의 경우에 대한 응답특성을 주파수 허용 변동범위(59.3Hz~60.5Hz)로 확장하여 계통과 PV시스템 상호간의 영향 및 응답특성을 도출하였다.

표 1 전압의 크기 및 차단시간규정 (IEEE 929-2000)[1]
Table 1 Response to abnormal voltages

Voltage Range(at PCC)		Maximum Trip Time
V<60	(V<50%)	6 cycles
60≤V<106	(50%≤V<88%)	120 cycles
106≤V≤132	(88%≤V≤110%)	Normal operation
132<V<165	(110% <V<137%)	20 cycles
165≤V	(137%≤V)	2 cycles

2.계통과 분산전원 상호간의 영향 및 응답특성

1.1 계통의 악영향에 대한 PV 시스템의 응답특성

PV 시스템을 배전계통에 연계하였을 경우 계통에서 발생하는 과도현상 혹은 순시정전, 과전압 및 부족전압 같은 외란으로 인해 PV시스템에 악영향 끼칠 수 있으며, 또한 원치 않은 PV 시스템의 운전정지가 이루어질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 계통에서 발생할 수 있는 외란에 대한 PCS의 응답 특성을 주파수 허용범위에 대한 악영향 허용수준을 시뮬레이션을 통하여 이를 검토하고자 한다.

1.1.1 과전압 및 부족전압

부하의 용량이 늘어나면 전압강하가 커지기 때문에 연계점 전압이 저하되는 문제가 발생한다. 또한 분산전원이 많을 경우 각각의 PCS의 운전 역률에 따라서도 배전계통에 전압변동이 일어날 수 있다. 이때 발생하는 과전압 및 부족전압이 PCS에 미치는 악영향을 주파수 허용범위로(59.3Hz~60.5Hz) 확장하여 응답특성을 확인하였다.

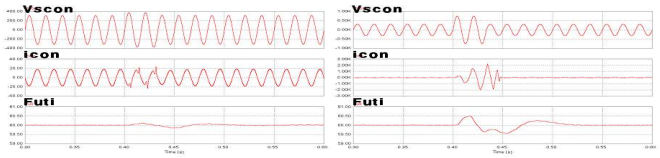
전압변화율 a_f를 다음 식과 같이 정의 한다.

$$a_f = \frac{V_X - V_S}{V_S} \times 100\% \quad (1)$$

여기서, V_S 정격전압의 실효값, V_X 과전압 및 부족전압

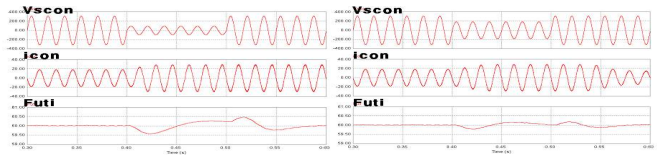
계통전압이 100-12%<V<100+10% 내에 있을 때에는 출력 주파수의 변동이 거의 없었다. 과전압과 부족전압 인가시 주파수 허용범위를 벗어나는 전압의 범위를 조사하기 위해 위의 허용 변동폭 -12%에서 +10%의 범위를 초과시켰을 경우 그 응답을 조사하였다. 그림 1과2는 2, 6 주기 동안 과전압과 부족전압을 각각 인가한 경우로 각 경우 전압변화율을 변화시키면서 주파수응답을 조사하였다. 과전압 인가 시 그림 1(b)의 140%이상

의 전압변화율이 되면 허용범위를 초과하였다. 반면 그림 2의 부족전압 인가 시에는 음의 변화율 −70%의 경우 그 허용주파수의 범위를 초과하였다.



(a) 2주기 동안 변화율 20% (b) 2주기 동안 변화율 140%

그림 1. 2주기 동안 양의 변화율 (20~200%)

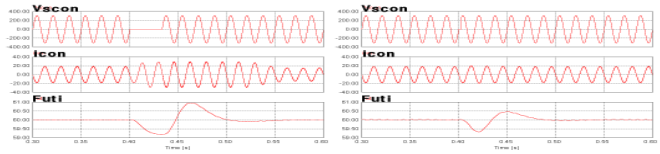


(a) 6주기 동안 노치율 -70% (b) 6주기 동안 노치율 -30%

그림 2. 6주기 동안 음의 변화율 (-20~-90%)

1.1.2 순간정전

순간정전에 대해서는 전기사업자가 수치적으로 규정하고 있지 않으므로 여기서는 계통전원이 순간적으로 공급되지 않는 상태로 정의한다. 정전시간에 따른 주파수응답은 그림 6과 같이 전원의 1/6주기보다 작은 정전시에는 실제로 문제가 나타나지 않으나 그 이상의 정전시 그 허용범위를 초과함을 알 수 있다.

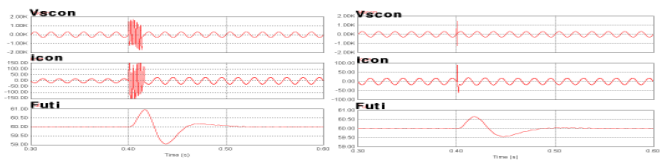


(a) 2주기 정전(33ms) (b) 1/6주기 정전(2.78ms)

그림 3. 정전 시간에 따른 주파수 변화

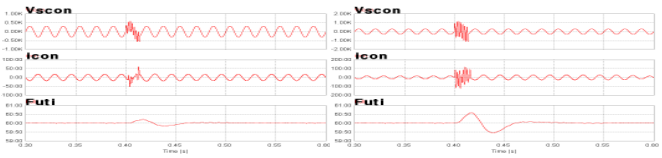
1.1.3 써지 및 순간과도전압

배전계통에 PV 시스템을 연계하려고 할 경우 과도현상에 대한 계통해석 및 이에 따른 적절한 보호시스템이 필요하게 된다. 과도전압은 유도성 부하의 온,오프시 발생되는 개폐 써지가 75~90%를 차지한다. 대체적으로 유도성의 부하, 엘리베이터, 전동기설비에서 연속적으로 발생되어지는 유도성의 값은 250[V]~3,000[V] 이상의 값을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 500[V]와 1[kV]의 전압을 중심으로 하여 그 주파수를 250[Hz]~10[kHz]의 값을 가지면서 계통에 나타나는 경우와, 주파수 500Hz, 1kHz의 두 주파수가 인가되는 써지가 200[V]~1300[V]의 전압이 인가될 경우를 각각 다루었고 그 결과는 그림 4와5에 나타내었다.



(a) 600Hz의 전압써지 (b) 1kHz의 전압써지

그림 4. 1000[V]의 써지전압이 7주기동안 인가된 경우의 주파수특성



(a) 200V의 전압써지 (d)500V의 전압써지

그림 5. 500[Hz]의 써지전압이 7주기동안 인가된 경우의 주파수특성

그림 4는 써지가 7주기 동안 1000[V] 전압이 인가될 경우 주파수의 응답특성을 조사하였다. 이로부터 낮은 주파수의 써지가 인가될 경우 주파수가 크게 변동되는 경향을 보였다.

그림5는 주파수를 중심으로 전압을 가변한 경우에 대한 시뮬레이션결과를 제시하였다. 그림 5에서 500[Hz]의 주파수를 갖는 써지가 인가될 경우 그 써지의 크기가 커질수록 주파수변동이 심해지는 경향을 보이고 있으며 500[V]이상의 전압이 인가되면 허용범위를 벗어나 문제가 됨을 알 수 있었다.

1.2 계통의 외란에 대한 PCS의 응답특성

계통의 외란의 변화에 대한 시스템의 응답특성을 주파수 허용범위로 그림 6~10에 이르기까지 변화량에 대한 함수관계를 도출하였다.

계통 전압의 정상범위에서는 문제가 없었고, 그림 6에서는 2주기의 과전압이 주어질 경우, 그리고 그림 7에서는 6주기의 부족전압을 각각 인가할 경우, 각각의 전압변화율을 변화시켜 주파수응답을 조사하였다. 과전압시 전압변화율에 따라 주파수 응답은 비례하는 경향을 보이고 약 140%에 달하면 완전히 허용범위를 벗어나 문제가 됨을 알 수 있다. 또한 6주기의 부족전압의 경우 노치율의 증가에 따라 함께 증대되고 있으며 이는 그림 7과 유사한 경향을 보이고 있다. 전압변화율이 −70%에 달하면 주파수 허용범위를 벗어난다. 순간정전에 대한 특성은 그림 8에서 나타내었는데, 1/6주기를 초과하면 주파수 허용범위를 벗어났으며, 다른 경우와는 달리 1/2주기에서는 오히려 문제가 없는 양상도 보이는 특이성이 발견되었다. 그림 9는 전압써지에 대한 특성으로 써지가 커질수록 주파수가 높아지는데, 써지주파수에 따른 차이도 있으나 대략 상한에서는 550[V]에서 주파수의 범위를 벗어났고 하한에서는 750[V]에서 허용범위를 초과하였다. 또한 그림 10은 전압써지 주파수에 대한 특성으로 상한은 약1[kHz]이하에서, 하한에서는 약 500[Hz]정도에서 문제가 나타났다.

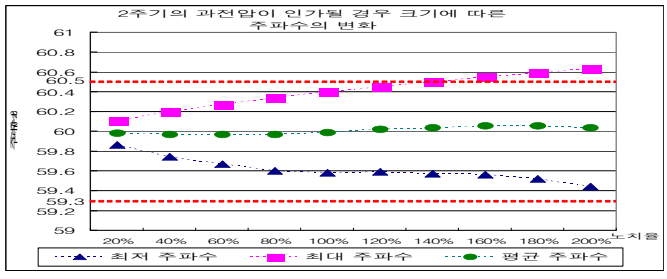


그림 6. 2주기의 과전압 인가시 주파수 변화

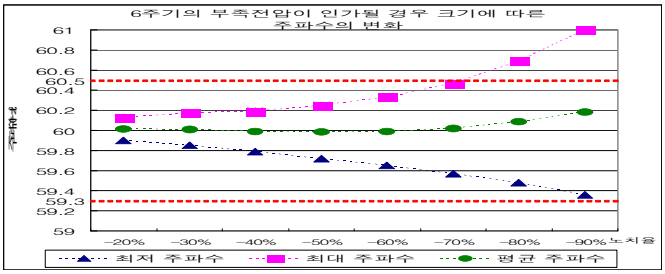


그림 7. 6주기의 부족전압 인가시 주파수 변화

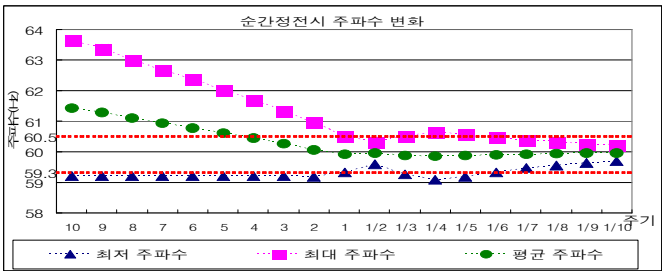


그림 8. 순간정전시 주파수 변화

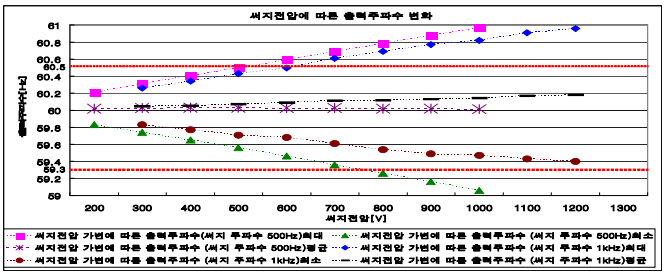


그림 9. 전압써지의 전압에 따른 출력 주파수 변화

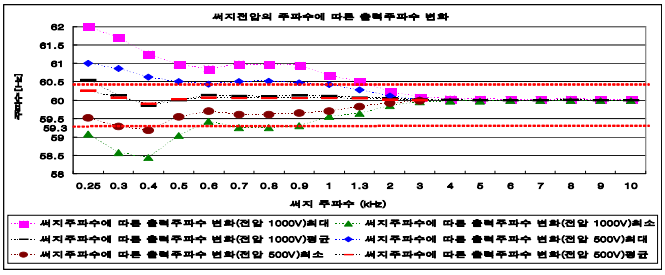


그림 10. 전압써지의 주파수에 따른 출력 주파수 변화

2.1 PCS 이상 출력에 대한 출력 주파수 응답특성

배전계통에 PV시스템을 추가할 경우 여러 가지 보호협조의 문제가 발생하게 된다. 단방향 전원에서 양방향 전원으로 바뀜으로 인해서 재폐로 차단기가 순시동작에 의해서 사고 차단 후 구분개폐기에는 PV시스템에 의한 사고전류가 흐르므로 구분개폐기의 오동작과, 수리공이 인식하지 못할 경우 인적사고의 위험이 있으며, 재폐로 차단기가 순시동작 후 재폐로시 PV시스템의 비동기 투입의 가능성이 있다. 비동기 투입 시 PV시스템 뿐 아니라 계통에도 악영향을 미치게 된다. 즉 정전등으로 인하여 계통과 분리되는 경우, 시스템이 단독운전 하는 것을 방지하여야 하며, 또한 시스템에서 내부의 노이즈 등에 의해 출력전류에 발생되는 고조파 성분과 직류성분이 계통에 영향을 미치지 않도록 제어함으로써 계통을 보호해야한다.

시뮬레이션을 통해 RPV 방식의 단독운전 불검출 영역과 제어신호의 노이즈에 의한 출력 전류의 왜형 등 분산전원의 이상 출력이 계통에 미치는 영향을 IEEE 929-2000의 규정을 바탕으로 각각의 출력에 대한 PCS응답특성을 주파수 허용 변동범위(59.3Hz~60.5Hz)로 확장하여 계통에 미치는 악영향의 범위를 주파수 허용범위로 도출하였다.

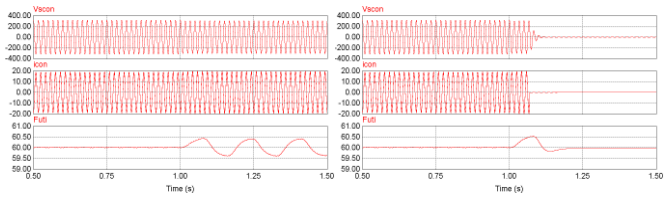
2.1.1 단독운전문제

단독 운전 현상으로 인해 출력 전압이나 주파수가 표1의 IEEE 929-2000 의 규정을 벗어나면 보호회로의 동작에 의해 발전 시스템이 정지하게 된다. 하지만 수동방식에 의한 단독운전방지 방식에는 부하에 따라 불검출 영역이 존재하게 되어 계통과 연계시 문제가 된다. 따라서 불검출 영역을 줄일 수 있는 능동적인 방식에 의한 단독운전 검출법이 사용된다. 본 논문에서는 인버터 출력 전류제어를 통해 계통에 무효전력을 주입하는 RPV방식의 제어법이 사용되었다. 만약 무효전력분이 계통과 연계된 다른 분산전원의 무효성분에 의해 보상이 된다면 단독운전으로 인한 문제가 발생할 수 있다. 본 시뮬레이션을 통해 계통에 악영향을 미치는 불검출영역의 범위를 무효전력주입량에 대한 단독운전시의 주파수 변동 특성으로 해석 하였다.

시뮬레이션은 용량 3kW RLC 부하로 IEEE 929-2000 규정의 조건인 q 를 2.5, RLC 부하의 공진 주파수가 60Hz, 주파수 허용범위를 $59.3 \le f_i \le 60.5$ 로 하여 단독운전시 전압 주파수가 이 범위를 벗어나는 무효전력 변동의 범위를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

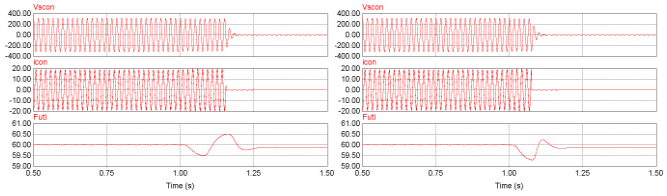
여기서 $$k = \frac{Q_{PV}}{P_{PV}} \times 100 = \frac{\text{무효전력}}{\text{유효전력}} \times 100 \qquad (2)$$

시뮬레이션을 통해 무효전력의 주입비율 k값이 양(+)일 때에는 k값이 6 이상부터 단독운전이 검출됨을 알 수 있고, k값이 음(-)일 때는 -5일부터 단독운전이 검출됨을 시뮬레이션을 통해 확인 할 수 있다. 또한 k 값의 변화에 따른 출력 주파수의 상한 하한을 그래프를 통해 확인하면, k값이 양(+)의 변화율일 때에는 IEEE 929-2000 의 주파수 규정의(59.3Hz~60.5Hz) 상한치를 범하여 단독운전을 검출하며, k값이 음(-)의 변화율 일 때에는 하한치를 범하여 단독운전의 검출이 가능하나, k 값이 -5, 와 -6 일 때는 상한치를 범하여 단독운전이 검출된다.



(a) k=5 일때 주파수 변화 (b) k=6 일때 주파수 변화

그림 11 k의 양의 변화율(0 ~ 7)



(a) k=-5 일때 주파수 변화 (b) k=-7 일때 주파수 변화

그림 12 k의 음의 변화율(-0.01 ~ -0.08)

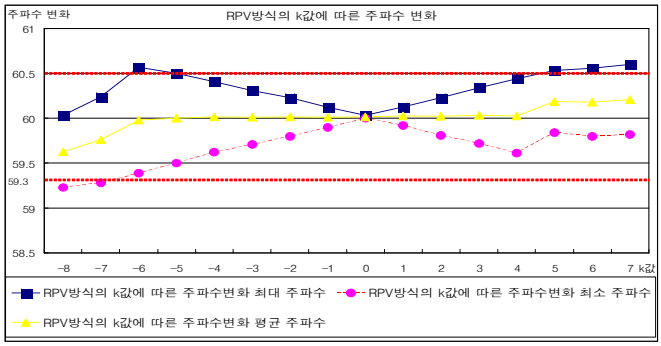


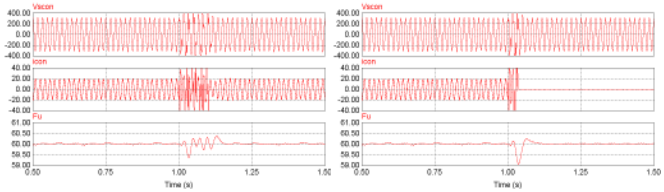
그림 13. RPV방식의 k값에 따른 주파수 변화

2.1.2 제어신호의 노이즈에 의한 PCS 출력 특성

계통에 연계되는 분산전원의 수가 늘어나면 다수의 분산전원 시스템이 계통에 미치는 영향은 점점 커질 것이다. 만약 시스템 내부 PLL 그리고 MPPT 전압 전류제어부의 제어 신호 측에 노이즈와 같은 외란이 발생되면 시스템의 오동작으로 인해 출력특성이 변할 수 있다. 이러한 문제를 분석하기 위해 제어신호에 외란을 주어 시뮬레이션을 하여 출력의 주파수 변동범위를 확인하였다. 시뮬레이션은 PWM신호의 기준전압(사인파)에 노이즈를 인가하여 출력 주파수를 임의로 주파수 허용범위를 벗어나게 함으로써 노이즈에 의한 PCS의 제어부의 오동작을 모의함으로써 계통에 미치는 악영향을 정도를 확인하였다.

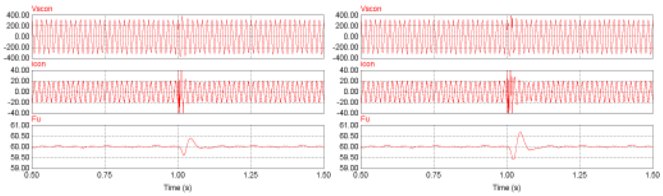
외란의 정도는 기준전압(사인파)대한 노이즈의 비로 각각의 주파수 100Hz, 500Hz 그리고 1000Hz의 10주기의 노이즈의 전압을 가변 하여 인가하였다.

그림 14와 15의 시뮬레이션 파형을 통해 100Hz 10주기의 노이즈 인가 시에는 노이즈의 비율이 기준전압 피크치의 3.5배를 초과 하였을 때 주파수 허용범위를 초과하였으며, 1000Hz 10주기의 노이즈를 인가 할 때는 기준전압 피크치의 2.5배를 인가할 때부터 주파수 허용범위를 초과하였다. 그림 18의 각각의 노이즈의 전압 변동에 따른 출력 주파수 변동특성을 살펴보면 제어신호에 인가되는 노이즈의 크기가 클수록 출력 주파수의 변동이 커짐을 확인 할 수 있다.



(a) 3배의 노이즈 (a) 3.5배의 노이즈

그림 14. 100[Hz]의 노이즈가 10주기동안 인가된 경우의 주파수특성



(a) 2.5배의 노이즈 (a) 3배의 노이즈

그림 15. 1000[Hz]의 노이즈가 10주기동안 인가된 경우의 주파수특성

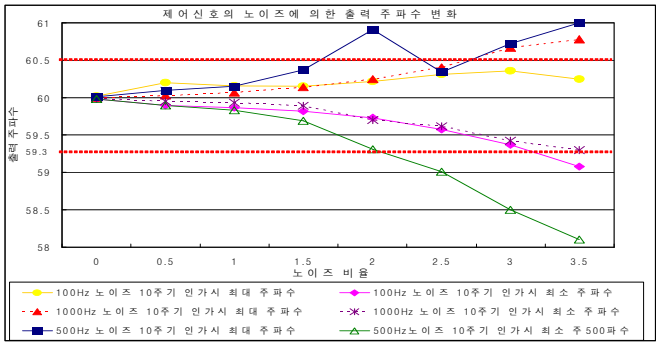


그림 16. 노이즈의 크기에 따른 출력 주파수 변화

3. 결론

PV시스템을 배전계통에 연계하였을 경우 계통에서 발생하는 과도현상 전압써지 혹은 순시정전 같은 외란으로 인해서 PV 시스템에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 단독운전의 주파수 범위에 의해 정상운전 중에 배전계통이나 상위 전력계통에 가끔 발생하는 이러한 외란에 의해서 인버터의 운전이 불필요하게 정지하는 사례가 발생되기도 한다. 본 논문에서는 이러한 계통에서 발생할 수 있는 과도현상 및 순시정전 등의 외란에 대한 PV용 PCS의 응답특성을 시뮬레이션을 통하여 주파수 허용범위에 대한 악영향 허용수준을 제시하였다. 또한 .시뮬레이션을 통해 RPV 방식의 단독운전 불검출 영역과 제어신호의 노이즈에 의한 출력 전류의 왜형 등 계통 연계형 PCS 의 이상출력이 계통에 미치는 악영향을 IEEE 929-2000의 규정을 바탕으로 각각의 PCS 출력특성을 주파수 허용 변동범위(59.3Hz~60.5Hz)로 확장하여 계통에 미치는 악영향의 범위를 주파수 허용범위로 도출하였다.

이 논문은 지식경제부의 연구비 지원에 의하여 연구되었슴

참 고 문 헌

[1] 조진파, 한동화, 이영진, 김영식, 권완성, 최규하, “계통의 악영향에 대한 PV 시스템의 응답특성” 전력전자학회

[2] 김홍성, 김한구, 최규하, 김재철, 최영호, “IEEE 929-2000 단독운전 시험조건 하에서 단상 계통연계형 PV 시스템의 Anti-Islanding을 위한 RPV 방식 및 AFD방식의 해석 및 설계”전력전자학회 논문지, pp. 37~49, 2007.